

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Sledování vlivu utvařeče třísky
a použitého stroje na vibrace soustavy
SNOP**

Monitoring the Influence
of Chipbreaker and used Machine
on Vibrations of SNOP System

Student:

Bc. Olga Smrčková

Osobní číslo:

SMR0033

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Olga Smrčková**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Sledování vlivu utvařeče třísky a použitého stroje na vibrace soustavy
SNOP
Monitoring the Influence of Chipbreaker and used Machine on
Vibrations of SNOP System**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor.
3. Příprava experimentu.
4. Experimentální část, měření vibrací.
5. Zhodnocení závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

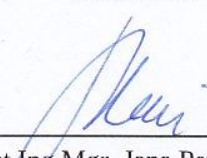
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina: EDIS Žilina. 2007, 243s. ISBN 978-80-8070-711-8.
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

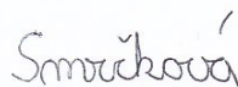



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne: 18. 5. 2020

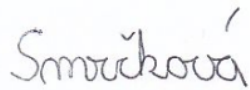
Handwritten signature in blue ink, reading "Smrčková".

.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 18. 5. 2020

.....


Podpis autora práce

ANOTACE DIPLOMOVÁPRÁCE

SMRČKOVÁ, O. Sledování vlivu utvařeče třísky a použitého stroje na vibrace soustavy SNOP: diplomová práce: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 61 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Diplomová práce se zabývá vlivem utvařeče třísky na vibrace při soustružení. Studie proběhla se čtyřmi typy vyměnitelných břitových destiček, které jsou kromě různého utvařeče třísky totožné. Měření vibrací proběhlo ve třech směrech. Tato práce ověřuje předešlý experiment, takže testování proběhlo za stejných podmínek, jako v předchozím testování, kromě použití jiného soustružnického centra. Tím pádem tento experiment hodnotí také vliv stroje na velikost vibrací během soustružení. Práce zahrnuje srovnání vibrací jednotlivých testování s hodnotami naměřenými v minulém experimentu, pro otestování vlivu stroje. Následně jsou pro aktuální i předchozí experiment porovnávány vibrace vznikající u jednotlivých destiček, ke sledování vlivu utvařeče třísky na vibrace při soustružení.

Klíčová slova: utvařeč třísky, vibrace, akcelerometr, soustružení

ANNOTATION OF MASTER THESIS

SMRČKOVÁ, O. Monitoring the Influence of Chipbreaker and used Machine on Vibrations of SNOP System: Master Thesis: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 61 p. Thesis Head: Kratochvíl, J.

This thesis deals with the influence of chipbreaker on vibrations during turning. The study was conducted with four types of inserts, which are identical, but had different chipbreaker. The vibration measurement was carried out in three directions. This work verifies the previous experiment, so the testing was done with the same conditions as in the previous testing, except for using another turning center. That mean, this thesis also evaluates the influence of the machine on the magnitude of vibrations during turing. The work includes comparison of vibration of individual tests with the values measured in the previous experiment to test the influence of the machine. Subsequently, for the current and previous experiment, the vibrations generated by the individual inserts are compared with each other to monitor the effect of the chip breaker on the vibrations during turning.

Keywords: chipbreaker, chatter, accelerometer, turning

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK	7
ÚVOD.....	10
1 VIBRACE PŘI OBRÁBĚNÍ	11
1.1 TYPY VIBRACÍ VZNIKAJÍCÍCH PŘI OBRÁBĚNÍ.....	12
1.1.1 Vynucené kmitání působící při obráběcím procesu	13
1.1.2 Samobuzené kmitání působící při obráběcím procesu.....	14
1.2 DIAGRAM STABILITY	16
1.3 TLUMENÍ VIBRACÍ PŘI OBRÁBĚCÍM PROCESU	18
1.4 TEORIE KMITÁNÍ A MĚŘENÍ VIBRACÍ.....	20
1.4.1 Piezoelektrické akcelerometry	24
2 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	25
2.1 POUŽITÉ PROSTŘEDKY	25
2.1.1 Testované VBD	26
2.1.2 Použitý nástrojový držák.....	30
2.1.3 Obráběný materiál	31
2.1.4 Použitý obráběcí stroj.....	32
2.1.5 Použité měřicí zařízení	34
2.1.6 Aplikovaný software	36
2.2 PRŮBĚH PŘÍPRAVY EXPERIMENTU	38
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST, MĚŘENÍ VIBRACÍ	42
4 VYHODNOCENÍ	43
4.1 VYHODNOCENÍ VLIVU STROJE NA VELIKOST VIBRACÍ.....	46
4.1.1 Hodnoty RMS při soustružení VBD typu A	46
4.1.2 Hodnoty RMS při soustružení VBD typu B	47
4.1.3 Hodnoty RMS při soustružení VBD typu C	49
4.1.4 Hodnoty RMS při soustružení VBD typu D	50
4.2 SROVNÁNÍ VIBRACÍ VZNIKAJÍCÍCH PŘI SOUSTRUŽENÍ JEDNOTLIVÝMI VBD	52
5 ZÁVĚR.....	56
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK

Značení	Jednotka	Význam
a	$[\text{m.s}^{-2}]$	zrychlení
a_1	$[\text{mm}]$	tloušťka třísky
a_p	$[\text{mm}]$	hloubka řezu
b	$[\text{mm}]$	šířka třísky
b_{mez}	$[\text{mm}]$	mezní šířka třísky
c	$[\text{N.m}^{-1}]$	tuhost pružiny
d	$[\text{kg.s}^{-1}]$	faktor tlumení
f	$[\text{mm}]$	posuv na otáčku
f_1	$[\text{s}^{-1}]$	frekvence
h_{d1}/h_{d2}	$[\text{mm}]$	jmenovité rozměry
k_c	$[\text{kg.mm}^{-2}]$	řezný odpor materiálu
m	$[\text{kg}]$	hmotnost kmitající soustavy
n	$[\text{min}^{-1}]$	počet otáček za 1 minutu
t	$[\text{s}]$	čas
v	$[\text{m.s}^{-1}]$	rychlost
y	$[\text{m}]$	výchylka
y_m	$[\text{m}]$	maximální výchylka
v_c	$[\text{m.min}^{-1}]$	řezná rychlost
y_{ef}	$[\text{m}, \text{m.s}^{-1}, \text{m.s}^{-2}]$	efektivní hodnota signálu
$y_{\text{stř}}$	$[\text{m}, \text{m.s}^{-1}, \text{m.s}^{-2}]$	střední hodnota signálu
$y_{\text{š}}$	$[\text{m}, \text{m.s}^{-1}, \text{m.s}^{-2}]$	špičková úroveň signálu
$y_{\text{šš}}$	$[\text{m}, \text{m.s}^{-1}, \text{m.s}^{-2}]$	úroveň signálu špička-špička
x	$[\text{m}]$	výchylka z rovnovážné polohy
\dot{x}	$[\text{m.s}^{-1}]$	rychlost

\ddot{x}	[m.s ⁻²]	zrychlení
Al ₂ O ₃	[–]	oxid hlinitý
D	[mm]	průměr obrobku
F	[N]	řezná síla
F _c	[N]	hlavní složka řezné síly
F _f	[N]	posuvová složka řezné síly
F _p	[N]	pasivní složka řezné síly
F(t)	[N]	periodicky proměnlivá síla
Im(ϕ)	[mm.N ⁻¹]	imaginární část záporných hodnot přenosové funkce
N	[–]	přirozené číslo
PC	[–]	osobní počítač
Re(ϕ)	[mm.N ⁻¹]	reálná část záporných hodnot přenosové funkce
RO	[–]	rychlořezná ocel
RMS	[m, m.s ⁻¹ , m.s ⁻²]	kvadratický průměr
RMS F	[mm.s ⁻²]	RMS výslednice zrychlení vibrací
RMS F _c	[mm.s ⁻²]	RMS zrychlení vibrací ve směru hlavní složky řezné síly
RMS F _f	[mm.s ⁻²]	RMS zrychlení vibrací ve směru posuvové složky řezné síly
RMS F _p	[mm.s ⁻²]	RMS zrychlení vibrací ve směru pasivní složky řezné síly
SK	[–]	slinutý karbid
SNOP	[–]	soustava stroje, nástroje, obrobku, přípravku
T	[s]	perioda
TiN	[–]	karbid titanu

TiCN	[-]	karbonitrid titanu
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
ε_r	[°]	úhel špičky nástroje
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
φ	[rad]	fázový úhel
ψ	[rad]	fázové posunutí
ω	[rad.s ⁻¹]	úhlový kmitočet

ÚVOD

V současné době je ve strojírenském průmyslu kladen důraz na vysokou hospodárnost procesu. Proces obrábění ovlivňuje celá řada faktorů, jako např. geometrie břitu obráběcího nástroje, vlastnosti integrity povrchu břitu, použitý povlak, řezné parametry procesu, obráběný materiál nebo chvění soustavy SNOP. I když vibrace mohou být v praxi výhodné, tak při obrábění mají zejména ve vyšší míře značně negativní dopad. Vibrace působí v určité míře při každém procesu obrábění a tyto proměnlivé síly způsobují opotřebení nástrojů, snižují kvalitu obrobků, poškozují obráběcí stroj a vytvářejí nadměrnou hluchost. Pro dosažení efektivní a hospodárné výroby je potřeba vibrace eliminovat. Podle řady výzkumů působí na velikost vibrací zvolené řezné podmínky, geometrie břitu, struktura materiálu a konstrukce obráběcího stroje.

Tato práce se zabývá působením utvařeče třísky a použitého stroje na vibrace soustavy SNOP. Celková studie proběhla se čtyřmi typy VBD určených k soustružení, vyrobených firmou Iscar, které jsou kromě různého utvařeče třísky totožné. Tyto VBD za různých řezných podmínek postupně soustružily ocel, kde během procesu byly měřeny vibrace ve směrech hlavních, posuvových a pasivních složek řezných sil pomocí akcelerometrů. Cílem diplomové práce je sledovat vliv daných utvařečů třísek na vibrace při soustružení na daném obráběcím centru. Tato práce ověřuje předchozí výzkum, který kromě použití jiného soustružnického centra proběhl za stejných podmínek, díky čemuž tato práce hodnotí také vliv stroje na vibrace při soustružení u testovaných VBD.

Obsahem teoretické části je rozdělení typů vibrací spolu s jejich charakteristikou a činiteli, které ovlivňují jejich vznik. V práci je zahrnut význam diagramu stability spolu s postupem, jak diagram vytvořit. Dále jsou doporučena opatření pro eliminaci vibrací. V závěru teoretické části práce jsou vypsány základní charakteristiky o teorii kmitavého pohybu a o měření vibrací. Praktická část zahrnuje celý postup měření a vyhodnocení vibrací spolu s popisem použitého nástroje, stroje, obrobku, použitého softwaru a měřicího zařízení. Z naměřených dat byla pro jednotlivé směry každého testování vypočítána hodnota RMS. Výsledné hodnoty RMS byly porovnány s hodnotami, které byly naměřeny a vypočítány v předchozím experimentu, pro zhodnocení vlivu stroje. Následně byly mezi sebou porovnány jednotlivé VBD pomocí výslednic daných směrů vibrací. V práci je zahrnuto také porovnání VBD, které proběhlo v předchozím experimentu pro optimální sledování vlivu utvařeče třísky na vibrace vznikající při soustružení v obou experimentech.

1 VIBRACE PŘI OBRÁBĚNÍ

Vibrace neboli chvění při procesu obrábění jsou dlouhodobým problémem pro dosažení co nejefektivnějšího řezného procesu. Mechanickým kmitáním se rozumí nabývání změn hodnoty fyzikální veličiny v určitých mezích v závislosti na čase. Tímto problémem se již v roce 1907 zabýval Frederick Taylor a svým výzkumem zjistil, že vibrace jsou jednou z nejrozsáhlejších potíží, se kterou se musí při obrábění potýkat. Frederick Taylor při svém výzkumu vytvořil vztahy, které jsou používány do dnes a určují vztah mezi řeznými podmínkami a trvanlivostí nástroje pro dosažení optimálního procesu. Výzkumem vibrací se posléze přibližně ve stejném časovém období bez závislosti na sobě zabývaly dvojice Fishwick, Tobias a Poláček, Tlustý. Navrhly teorii regenerace, která uvádí, že vibrace jsou při obrábění způsobeny regenerativním kmitáním, které je zapříčiněno dynamickou pružností obrobku a nástroje při procesu odebrání třísky a odvodili vztah, který určuje závislost mezi řeznými parametry, tedy mezi okamžitou tloušťkou třísky, řeznou rychlostí, posuvem a celkovou řeznou silou F . [1, 2, 3]

Pokud se hovoří o mechanickém kmitání, tak se stává kmitající veličinou některá mechanická veličina. Jde tedy o fyzikální jev, při kterém buď hmotný bod, nebo popřípadě tuhé těleso mění v závislosti na čase svoji polohu v prostoru, ale pouze v určitém intervalu hodnot kolem své rovnovážné polohy. Tato poloha je v prostoru určena polohovým vektorem a tím pádem lze v jakémkoliv časovém momentu určit fázi a amplitudu tohoto vektoru. Mezi veličiny, které se v čase mění a určují kmitání, patří poloha, rychlost a zrychlení. Mechanické kmitání je dynamickým dějem a dochází k němu při provozu veškerých obráběcích zařízení. Jedná se o velice složitý jev, jelikož se celková soustava obráběcích strojů skládá z hmotných a pružných těles. Malé kmitání nemusí mít na obráběcí proces nějak významný negativní vliv, ale naproti tomu rozsáhlejší kmitání může mít velmi nepříznivý účinek. Proto je strojní kmitání velmi významný obor, který je potřeba zkoumat. [4, 5, 6, 7]

Proces obrábění s rovnoměrným řezným pohybem se tedy považuje za dynamický proces, který je v setrvačném stavu, ale účinkem periodických sil, které během procesu působí, je tento klidový stav ovlivněn. Tyto síly pak vytvářejí chvění systému SNOP, což způsobuje plno negativních okolností. Mezi tyto nepříznivosti se řadí opotřebení bříty nástroje (nástroje z RO se rychleji otupí, u nástrojů ze SK dochází k vydrolování ostří a klesá trvanlivost řezné keramiky), celkové nevyužití vlastností obráběcího stroje a řezivosti nástroje, negativní ovlivnění jakosti obrobku (tvarové a rozměrové nepřesnosti, větší drsnost povrchu), opotřebování součástí obráběcího stroje a negativní ovlivnění pracovního prostředí hlukem a zvuky. [8, 9]

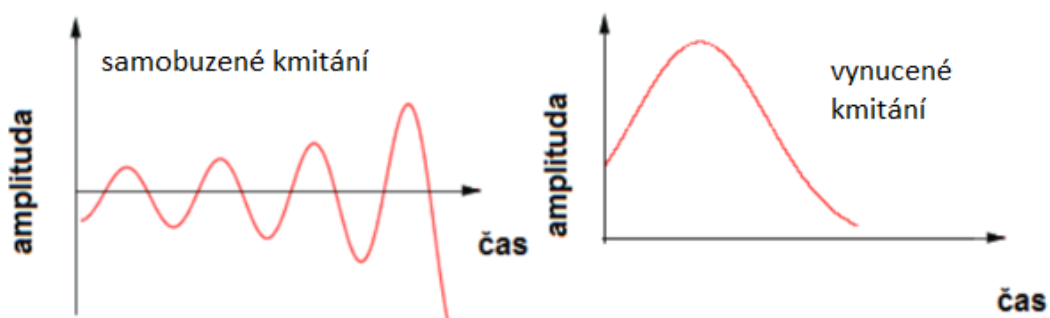
1.1 Typy vibrací vznikajících při obrábění

Kmitání lze dělit dle více faktorů, ale z fyzikálního hlediska podle příčiny, která kmitání způsobuje, se kmity dělí na vynucené a samobuzené. Při obrábění se vyskytuje také kmitání vlastní, jež je zapříčiněno vlastním kmitáním určité části obráběcího systému. K tomuto kmitání dochází například při zapnutí zubové spojky nebo při prvním kontaktu nástroje a obrobku. Účinek vlastních kmitů se při analýze většinou zanedbává, jelikož jsou regulovány pružnými silami. Vlastní kmitání je tlumeno také působením odporů. Proto je dále tato práce zaměřena jen na kmity vynucené a samobuzené. [8, 9]



Obrázek 1 – Mění se amplituda kmitání v závislosti na čase u vlastního kmitání [3]

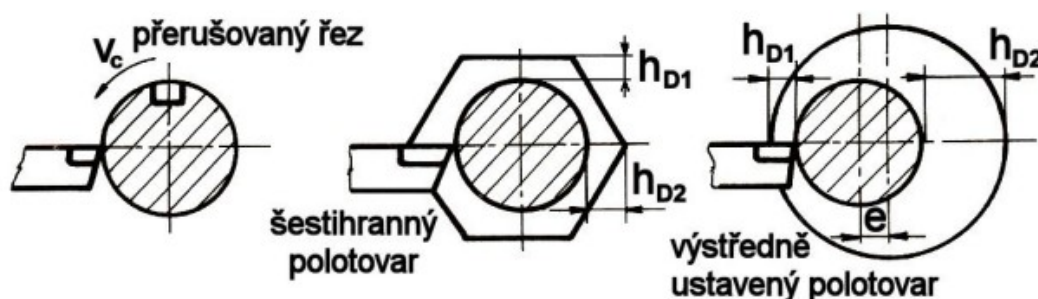
Při vynuceném a samobuzeném kmitání může budící síla souviset i nesouviset s řezným procesem, ale v obou případech se jedná o negativní jev. Budící síly, které nesouvisí s procesem řezání, je možné utlumit či vyloučit relativně jednoduše, a to různými zásahy technického charakteru. Mnohem problematičtější je utlumovat kmity, které mají souvislost s procesem řezání. [8, 10]



Obrázek 2 – Časová závislost amplitudy samobuzeného a vynuceného kmitání [3]

1.1.1 Vynucené kmitání působící při obráběcím procesu

Vynucené kmitání vzniká působením sil působících na systém SNOP, které se v závislosti na čase periodicky mění. Frekvence tohoto druhu chvění je stejná, jako frekvence budící síly. Pokud tato síla vymizí, tak vynucené kmitání odezní. Příčina těchto sil je obvykle v pohybovém mechanismu stroje či mimo obráběcí stroj. Eventuálně mohou síly souviset s nástrojovým pohybem nebo s pohybem obrobku. Tento druh kmitání se objevuje i v případě, když obráběcí stroj není v provozu. Vynucené kmitání nesouvisející s řezným procesem má malou amplitudu, a proto je nejvíce ohrožující při dokončovacích operacích. Naproti tomu kmity, které jsou zapříčiněny vlastním řezným procesem, mají velkou amplitudu, takže způsobují negativa, jak při dokončovacích operacích, tak i při hrubování. [4, 8, 11]



Obrázek 3 – Příčiny vynuceného kmitání [10]

- Vynucené kmitání nesouvisející s procesem řezání.

Tento případ kmitání se při obrábění objevuje často a působí zejména na jakost obrobené plochy. Tím pádem je nezbytné se těmito kmity zabývat a vynaložit snahu o snižování tohoto typu vibrací. Tyto budící síly způsobující kmitání lze celkem snadno utlumit vhodnými technologickými zásahy. Zdrojem se stávají různé opakující se rázy v zařízeních, které se vyskytují v blízkosti obráběcího stroje. Tyto stroje pak šíří podlahou svoje vibrace. Kmitání, které je vyvolané vnější budící silou, je matematicky vyjádřeno dle vzorce: [4, 7, 8, 10]

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + cx = F(t) \quad (1)$$

, kde

- m je hmotnost kmitající soustavy [kg],
- d je faktor tlumení [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$],
- c je tuhost pružiny [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$],
- x je výchylka z rovnovážné polohy [m],
- \dot{x} je rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- \ddot{x} je zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

Kmitání způsobené budící silou působící na soustavu SNOP zevnějšku, které nemá souvislost s vlastním řezným procesem lze snižovat vhodným odstíněním obráběcího stroje. Toto odstínění se dělí na aktivní a pasivní. Pasivní odstínění, např. uložení stroje na pružné podložky, má svoji oblast využití, pokud jsou vlastní frekvence stroje nižší než frekvence budící síly. Pokud je tomu naopak, používá se aktivní odstínění, které spočívá v odizolování zdroje budící síly. [11]

Zdrojem tohoto typu vynuceného kmitání se stává také vlastní soustava stroje, což může nastat v případě nevyvážených rotujících částí. Může se jednat o části stroje, nástroje i obrobku, např. pokud těžiště obrobku při soustružení není umístěné v ose rotačního pohybu, což nastává v případě nepravidelných odlitků nebo výkovků. Vlivem setrvačných sil působících při vratném přímočarém pohybu strojového mechanismu může rovněž vznikat tento druh vynuceného kmitání. Vzniká také v převodovém mechanismu stroje, a to nepřesnostmi jeho jednotlivých částí a různorodou tuhostí částí systému SNOP. [4, 7, 8, 10]

- **Vynucené kmitání související s procesem řezání.**

Tento druh kmitání je méně snadné utlumovat, protože pro tlumení těchto kmitů je potřeba změna řezných parametrů, a to nemusí být vhodné z hlediska požadavků na optimalizaci procesu. Vzniká působením budících sil, které mají souvislost s řezným procesem. Původem může být periodická změna řezného odporu. To nastává při proměnlivé hloubce řezu, např. při hrubování složitějších výkovků a odlitků. Zapříčiněním se rovněž stává cyklicky přerušovaný řez, ke kterému dochází u soustružení hřídele s drážkou nebo obecně ke změně průřezu třísky dochází při frézování. [10, 11]

Eliminace spočívá v tlumení kmitání pomocí tlumičů, setrvačníků a frézovacími hlavami s různou roztečí nožů. Zvyšování tuhosti soustavy SNOP a odstraňování periodicky budících sil také napomáhá eliminaci tohoto typu vibrací. [8, 11]

1.1.2 Samobuzené kmitání působící při obráběcím procesu

Samobuzené kmitání se vytváří a udržuje bez působení vnější periodické budící síly. Frekvence je určena vlastnostmi systému, který kmitá a stává se blízky vlastní frekvenci nějakého řídicího členu obráběcího systému. Příčinou jsou síly, jejichž působení začíná během kmitání. Pokud jsou tyto budící síly eliminovány, vibrace ustanou. Pokud budící síly začnou opět působit, nastanou vibrace systému. [8, 11]

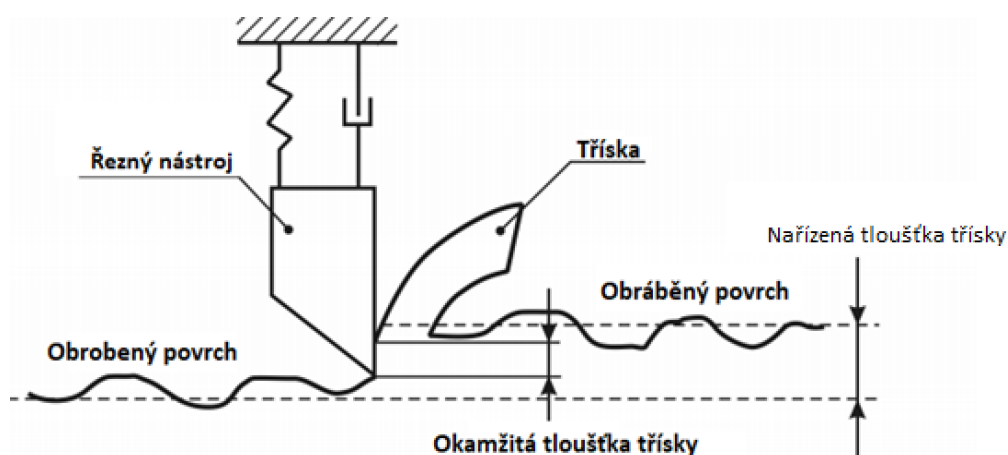
- **Samobuzené kmitání nesouvisející s řezným procesem.**

Do této kategorie patří relaxační kmitání, které vzniká v průběhu řezání měnící se hodnotou součinitele tření na kluzných plochách v případě změn posuvové rychlosti. Eliminace tohoto negativního jevu spočívá v aplikaci vhodných mazacích prostředků na stykové plochy, výběrem materiálů s adekvátními kluznými vlastnostmi (popřípadě vhodnými povlaky aplikovanými na řezných nástrojích) nebo použitím valivého uložení. Pokud obráběcí proces probíhá při menších řezných rychlostech, tak lze vibrace snižovat zesílením tuhosti hnacího mechanismu. Kmitání bez souvislosti s řezným procesem může vznikat u obráběcích strojů s kopírovacím zařízením se zpětnou vazbou. [8, 11]

- **Samobuzené kmitání související s řezným procesem.**

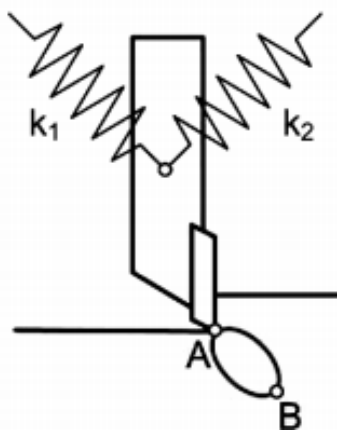
Jedná se o nejčastější druh kmitání, který může značně negativně ovlivňovat jakost obrobené plochy a trvanlivost nástroje. Při tomto druhu kmitání vzniká obrobená plocha s nepříznivou vlnitostí a během jejího vzniku dochází k výraznému hluku. Samobuzené kmitání se souvislostí na řezném procesu vzniká pouze ve specifickém rozsahu řezných podmínek. Omezovat ho tedy lze adekvátními řeznými podmínkami. Mezi hlavní faktory, které způsobují toto kmitání, patří vlnitost obráběného povrchu, nestabilita nárůstku, změna součinitele tření v závislosti na rychlosti pohybu a postupné oddělování jednotlivých článků stříhané třísky. [8, 11]

Do této skupiny patří reprodukční kmitání, jehož teorie je vypracována na dvou předpokladech. Předpokládá se zvlněný povrch obrobku a jeho dokonalá tuhost. Proces reprodukčního kmitání započne vibrací nástroje, jenž je způsobena vlnitostí obráběného povrchu z předcházejících operací, což mění řeznou sílu. Tím vlivem se na povrchu obrobku vytvoří vlna, která odráží tento relativní pohyb. To způsobuje změnu tloušťky třísky, která má účinek na hodnoty řezných sil, což vede k dalším vibracím systému. K tomuto kmitání dochází většinou vlivem různé struktury materiálu. [8, 11, 12]



Obrázek 4 – Změna tloušťky třísky způsobena reprodukčním kmitáním [12]

Další teorie, která popisuje samobuzené kmitání je princip polohové vazby. Podle tohoto konceptu dochází ke vzniku samobuzeného kmitání působením současných kmitů, které působí ve dvou na sobě kolmých směrech. Jedná se o kmity se stejnou frekvencí a konstantní vzájemnou fází. Tyto kmity vedou k tomu, že se břit pohybuje po eliptické dráze. Pokud se na obrázku číslo 5 předpokládá pohyb nástroje po eliptické dráze podle směru hodinových ručiček, tak při tomto pohybu z bodu A do bodu B, proti pohybu obrobku působí řezná síla a tím odebírá energii ze soustavy. Jakmile se nástroj pohybuje z bodu B do bodu A, dochází naopak k přísunu energie do tohoto systému. Řezná síla je při tomto pohybu větší, jelikož se nástroj nachází ve větší hloubce. Tím vlivem je více energie do systému dodáno, než je odebráno pohybem nástroje z bodu A do bodu B. Přebytečnou energii je nutné tlumit, jinak může docházet ke vzniku samobuzeného kmitání, a to i při obrábění hladkého povrchu. Pro vznik tohoto kmitání je velmi určující, jakou orientaci má řezná síla vzhledem ke kmitavé soustavě stroje. [13]



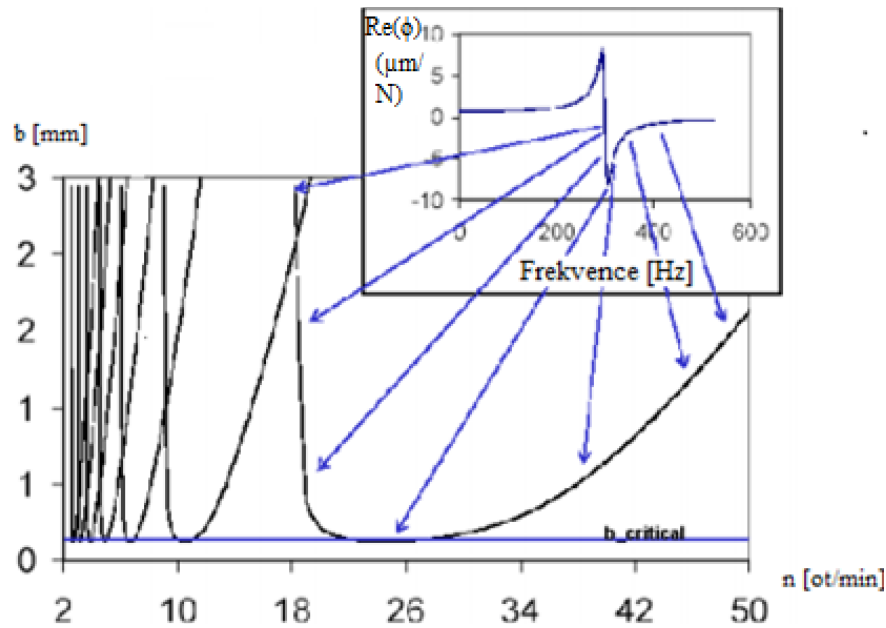
Obrázek 5 – Princip polohové vazby [14]

1.2 Diagram stability

Pomocí diagramu stability lze zjistit, při jaké tloušťce třísky a otáčkách nedochází ke vzniku samobuzených kmitů a tím pádem lze použít jak k prvotní volbě řezných podmínek, tak i při optimalizaci řezného procesu. Diagram stability zahrnuje mezní křivky stability, tedy závislosti mezní šířky třísky na daných otáčkách vřetene. Diagram pak vznikne složením těchto jednotlivých křivek. Stabilní oblast se nachází pod křivkou stability. Nad touto křivkou dochází ke vzniku nežádoucího samobuzeného chvění. [15, 18]

Pro vytvoření tohoto diagramu se nejprve určují amplitudo-fázové frekvenční charakteristiky, které lze získat měřením na stroji se zkoumaným nástrojem. K tomuto měření se používá PC s vhodným softwarem, ke kterému je pomocí propojovacího zařízení připojen akcelerometr a kladívko. Akcelerometr se připevňuje na měřený nástroj.

V softwaru se nastavují směry, ve kterých probíhá měření odezvy systému na dané impulsy kladívka. Nastavuje se i hodnota měrného řezného odporu materiálu, tedy k_c . Nejprve se provádí, alespoň dva kalibrační údery pro zjištění impulsu, který je určitá měřicí soustava schopna zaznamenat. Tento kalibrační proces pomůže zjistit, jestli nebyl například úder rázovým kladívkem příliš slabý nebo kladivo nedopadlo pod nevhodným úhlem. Hodnota impulsu se v takových experimentech velmi často měří siloměrem, jenž je umístěn v modálním kladívkem. Jakmile je nastavený optimální impuls síly, provádí se více klepnutí kladívkem. Výsledkem měření je graf závislosti přenosové funkce $Re(\Phi)$ na frekvenci. [15, 18]



Obrázek 6 – Tvorba diagramu stability [26]

Z výsledné funkce je středem zájmu pouze negativní část nejvíce dominantního kmitu. Pomocí záporných hodnot přenosové funkce se určuje mezní šířka třísky pro stabilní proces obrábění. Tyto hodnoty se dosazují do vzorce: [15]

$$b_{mez} = \frac{-1}{2 \cdot k_c \cdot Re(\phi)} [mm] \quad (2)$$

, kde

k_c je řezný odpor materiálu [MPa],

$Re(\Phi)$ je reálná část záporných hodnot přenosové funkce [$mm \cdot N^{-1}$].

Dále je potřeba určit fázové posunutí ψ pro odpovídající hodnoty frekvencí pomocí vzorce: [15]

$$\psi = 2 \cdot \pi - 2 \cdot \arctg \frac{Im(\phi)}{Re(\phi)} [rad] \quad (3)$$

, kde

$Re(\Phi)$ je reálná část záporných hodnot přenosové funkce [$mm \cdot N^{-1}$],

$Im(\Phi)$ je imaginární část záporných hodnot přenosové funkce [$mm \cdot N^{-1}$].

Hodnoty odpovídajících otáček lze následně vypočítat pomocí vzorce:

$$n = \frac{60}{z \cdot (N + \frac{\psi}{2 \cdot \pi})} [\text{min}^{-1}] \quad (4)$$

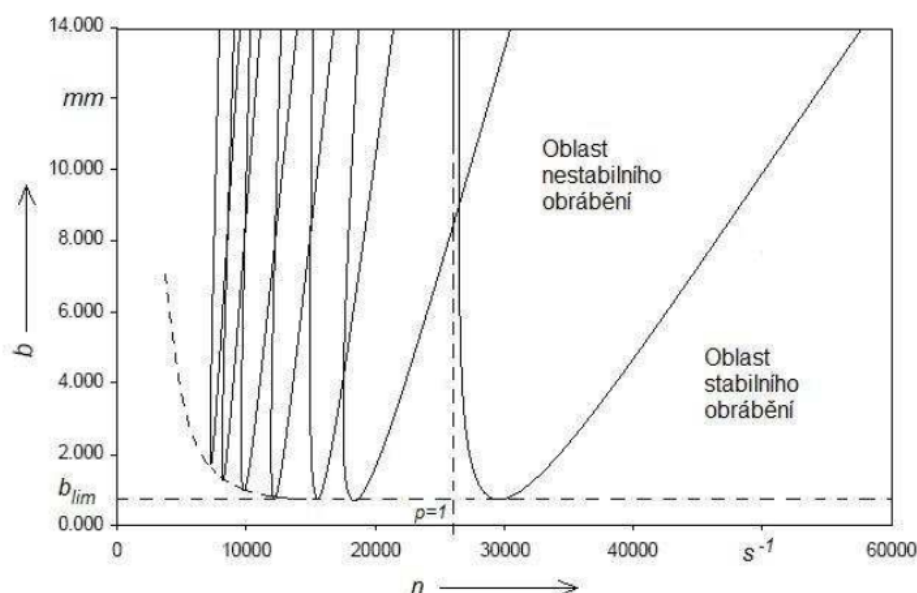
, kde

ψ je fázové posunutí [rad],

z je počet zubů nástroje [-],

N je počet celých vln na povrchu mezi po sobě následujícími řezy ($N = \{0, 1, 2, 3, \dots, n\}$) [-].

Tímto způsobem lze vykreslit $N+1$ mezních křivek pro určitý rozsah otáček. Hodnoty b_{mez} se vynášejí v závislosti na otáčkách do grafu, kde vznikne určitý počet mezních křivek, které určují maximální šířku třísky, při které nedochází k výskytu samobuzeného chvění. Na obrázku číslo 7 lze vidět stabilní a nestabilní oblast u jedné mezní křivky. [15, 18]



Obrázek 7 – Oblast stabilního a nestabilního obrábění u jedné mezní křivky [15]

1.3 Tlumení vibrací při obráběcím procesu

Obecně existuje několik způsobů, jak kmitání při obráběcím procesu co nejvíce eliminovat. Samozřejmě při optimalizaci procesu z hlediska snižování vibrací vše záleží na celkových požadavcích na obrobek a na možnostech obráběcího procesu. Řezné podmínky, geometrie nástroje a tuhost soustavy spolu souvisí, takže při obráběcím procesu může při eliminaci vibrací pomoci úprava jen pár, ale vhodných parametrů ze zde vypsanych poznatků. Samozřejmě činitelů, jež ovlivňují vibrace je více a některé jsou do

nynější doby ve fázi výzkumu. Niže jsou vypsané některé ze základních opatření pro snížení vibrací. [8]

Základem pro eliminaci kmitů je vhodná volba řezných podmínek. Mezi náležitá opatření spadá: [8, 11, 16, 17, 18, 19]

- Hloubka odřezávané vrstvy a_p by měla být zvolena vyšší než poloměr zaoblení špičky. Se zvyšující hodnotou a_p se amplituda kmitů snižuje.
- Volba nižší tloušťky třísky, jelikož s jejím růstem stabilita řezného procesu lineárně klesá.
- Volba optimálního poměru $\frac{b}{a_1}$, u nástrojů z rychlořezné oceli je potřeba zmenšení tohoto poměru.
- Pro snížení chvění je výhodnější obrábět s vyšší řeznou rychlostí.
- Posuv je obvykle volen tak, aby jeho velikost dosahovala alespoň hodnoty 25ti procent z poloměru zaoblení špičky břitů řezného nástroje.
- Zvolení optimální plochy průřezu třísky. Nadměrně velké plochy průřezu třísky vedou k vibracím nástroje. Samozřejmě s ohledem na body popsané výše.
- U nástrojů s dlouhým vyložení lze chvění snižovat vyšší rychlostí posuvu, popřípadě změnou řezné rychlosti. Ve většině případů se adekvátních výsledků dosahuje zvýšením hodnoty řezné rychlosti.

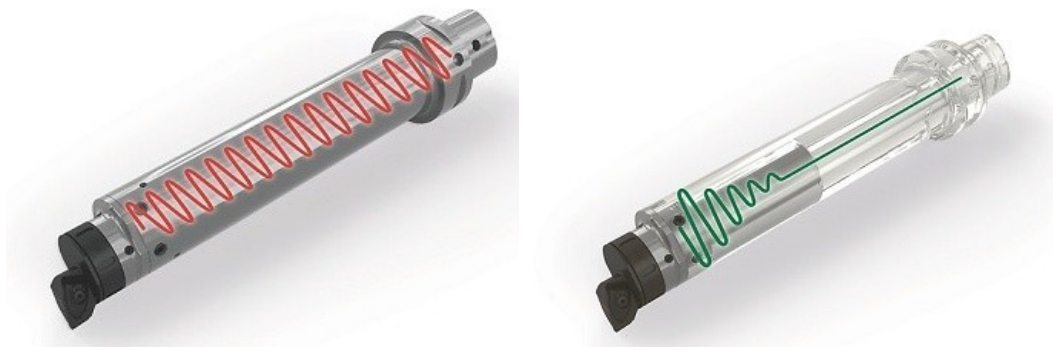
Geometrie nástroje ve značné míře ovlivňuje chvění při obrábění. Mezi osvědčené metodiky patří: [11, 16, 17, 18]

- Zejména změna úhlu κ_r , při malé hodnotě tohoto úhlu s danými řeznými podmínkami se zvyšuje radiální síla účinkující mezi nástrojem a obrobkem, čímž je obrobek více prohýbán a chvění se zvyšuje.
- Volba patřičného úhlu čela, jelikož při použití nástroje s pozitivním úhlem čela jsou potřeba menší řezné síly, které snižují průhyb nástroje.
- Zvětšování úhlu hřbetu, ale pouze do hodnoty 10° , protože nad touto hodnotou již nedochází ke snižování vibrací.
- Pro eliminaci vibrací je adekvátní volit úhel špičky nástroje ε_r co nejnižší.
- Zmenšování poloměru špičky napomáhá ke snížení vibrací.
- Zhotovení fazetky na čele nástroje.

Zvýšením tuhosti obráběcí soustavy lze obnovit stabilitu řezného systému z hlediska vibrací. Zvýšit tuhost lze například: [8, 13, 20, 21]

- Použitím trnu s větším průřezem.
- U frézovacích hlav vibrace eliminuje použití setrvačnicků.

- Změnou průřezu nástroje.
- Podepřením obráběné součásti.
- Změnou vyložení nástroje pro obrábění.
- Ustanovením nože pod osu rotace obrobku.
- Vhodným výběrem obráběcího stroje, který by měl být vyrobený z vhodných materiálů, které co nejvíce odolávají vibracím (např. šedá litina). Jednotlivé části stroje a spoje mezi těmito částmi by měly být z konstrukčního hlediska správně navrženy. Zařízení pro obrábění lze vyrobit z prvků z vysoké pevnosti a může být zatížené betonem či jiným materiálem, který pohlcuje negativní chvění.
- Správným držákem na nástroj. Vhodnou možností jsou nástroje s kuželovou stopkou, tzv. Morse kužely. Nejlépe pokud je nástroj upnut do vřeten stroje tepelným, hydraulickým nebo silově-deformačním mechanismem. Materiál držáku, který velmi dobře tlumí vibrace je slinutý karbid wolframu. Při soustružení je nutné stabilně upnout obrobek.
- Použitím nástroje s vyššími kluznými vlastnostmi, s nízkou drsností povrchu a s vysokou pevností.
- Použitím pasivních tlumičů. Jedná se o držák na nástroj, který obsahuje tlumič skládající se z hmoty s vysokou hustotou.
- Při obrábění tenkostěnných dílů lze změnit jejich konstrukci.

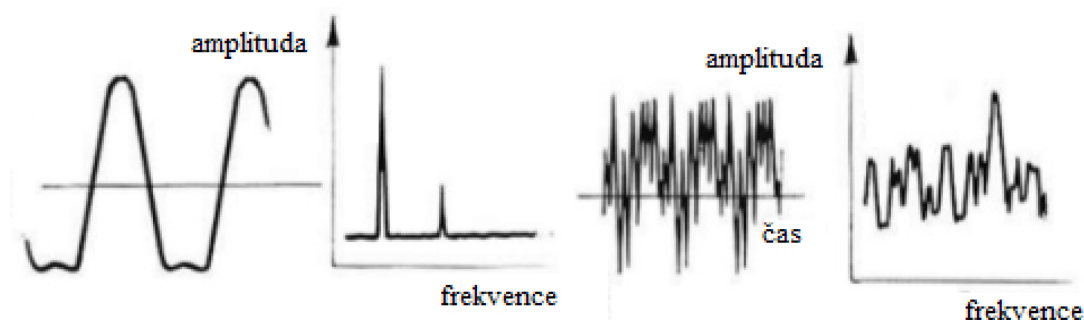


Obrázek 8 – Běžný držák (vlevo) a držák se systémem tlumení vibrací [21]

1.4 Teorie kmitání a měření vibrací

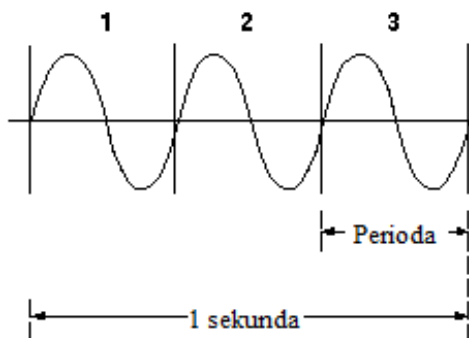
Před rozбором měření vibrací je potřebné znát základní charakteristiky o teorii kmitavého pohybu. Frekvence [Hz] je kolikrát se opakuje jeden cyklus v průběhu jedné sekundy. Na obrázku číslo 9 (vlevo) lze vidět kmitání s jedinou výraznější frekvencí. Signál se většinou skládá z více frekvencí, viz obrázek 9 (vpravo) a u takových signálů je velmi nesnadné určit zdroj těchto signálů. Proto se v takových případech používá frekvenční analýza, kdy jsou dílčí signály rozkládány na jednotlivé frekvence

a amplitudy, jenž těmto frekvencím náleží. Výsledkem je potom graf, který se nazývá frekvenční spektrogram. Díky tomuto grafu je možné rozeznat frekvence, které mají výrazné amplitudy kmitání a také určit zdroje těchto kmitů. Perioda [s] potom udává čas, který je potřebný k tomu, aby se daný systém dostal do původního stavu. [4]



Obrázek 9 – Kmitavý pohyb s jedinou výraznou frekvencí (vlevo) a kmitavý pohyb s více frekvencemi (vpravo) [22]

Na obrázku číslo 10 lze vidět signál, jehož průběh trvá jednu sekundu. Během této doby se signál třikrát vrátí do původního stavu, takže hodnota frekvence jsou 3 Hz.



Obrázek 10 – Frekvence a perioda [23]

Mezi frekvencí a periodou, tedy platí vztah:

$$f_1 = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad (5)$$

, kde

T je perioda [s],

f_1 je frekvence [Hz].

Kvalifikovat úroveň vibrací lze různými parametry. Mezi často používané parametry patří: [4]

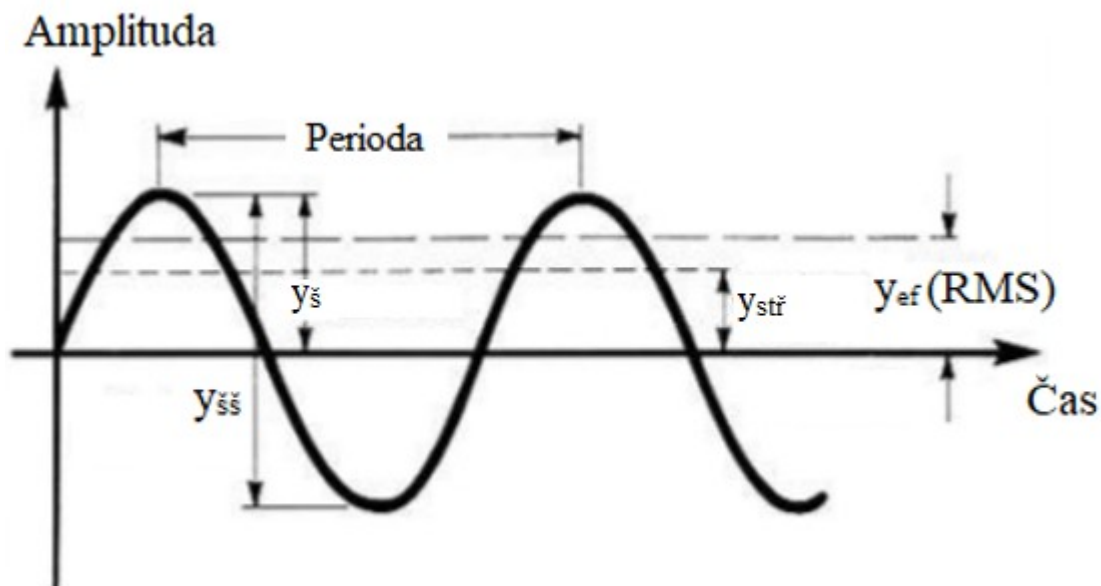
- y_{ss} (špička-špička) – Tento parametr vyjadřuje, jakého maximálního rozkmitu signál dosáhne.

- $y_{\text{š}}$ (špička) – Jedná se o absolutní hodnotu od nuly po maximální bod v celém kontrolovaném pásmu. Tato hodnota neukazuje průběh celého kmitání, takže pro popis signálu není vhodné použít pouze tento parametr.
- $y_{\text{stř}}$ (střední hodnota) – Tato hodnota zaznamenává průběh celého kmitání, ale její použití v praxi je omezené, jelikož není vázána na žádnou fyzikální veličinu.

$$y_{\text{stř}} = \frac{1}{T} \int_0^T [y(t)] dt \quad (6)$$

- y_{ef} (efektivní hodnota RMS) – Tento parametr nejlépe vystihuje daný signál. Jeho hodnota zahrnuje jak amplitudy signálu, tak i celý jeho průběh. Získanou hodnotu je možné vztahovat k energii.

$$y_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} \quad (7)$$



Obrázek 11 – Kvalifikace úrovně vibrací [24]

Kmitání lze popsat dráhou (neboli výchylkou), rychlostí nebo zrychlením. Tyto veličiny jsou na sebe vázány matematickými vztahy, takže lze změřit pouze jednu z těchto veličin a ostatních se dopočítat dle daných vzorců (viz vzorce 10 a 11). Veličina, která je zvolena pro popis vibrací se vybírá dle zvoleného měřítka a podle časového posunu fáze. Pro měření s rozsahem frekvence od 10 Hz do 1000 Hz se pro analýzu vibrací používá rychlost, která je rovna první derivaci výchylky dle času. Pro vyšší frekvence je optimální použít zrychlení a pro nižší frekvence zase výchylku. Záleží také na sledovaném frekvenčním rozsahu. Pokud zahrnuje vysoké frekvence (např. zubové), tak se stává zrychlení nejvhodnější volbou pro popis kmitání. Naproti tomu, jestli bude dané měření omezeno na otáčkovou frekvenci, tak je pro rozbor vibrací optimální volbou výchylka a rychlost. U rotujících částí jako jsou pohony, motory, větráky atd. je tedy

nejvýhodnějším parametrem pro analýzu vibrací rychlost, jelikož není nutné řešit frekvenci, při jaké byla daná hodnota rychlosti naměřena. U zbylých dvou veličin je potřeba uvést, při jaké frekvenci otáčení je daná hodnota naměřena, aby bylo možné ohodnotit vliv stavu stroje. Měření výchylky má v praxi využití pro identifikaci nevyvážených rotačních strojních součástí. [25]

Harmonické kmitání je popsáno pro jeho výchylku vztahem:

$$y = y_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \text{ [m]} \quad (8)$$

, kde

y_m je maximální výchylka [m],

ω je úhlový kmitočet [rad.s^{-1}],

t je čas [s],

φ je fázový úhel [rad].

Úhlový kmitočet lze vypočítat dle vztahu:

$$\omega = 2\pi f \text{ [rad.s}^{-1}\text{]} \quad (9)$$

Rychlost je potom vyjádřena první derivací dráhy podle času:

$$v = \frac{dy}{dt} \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (10)$$

Podobně je tomu u zrychlení, kdy:

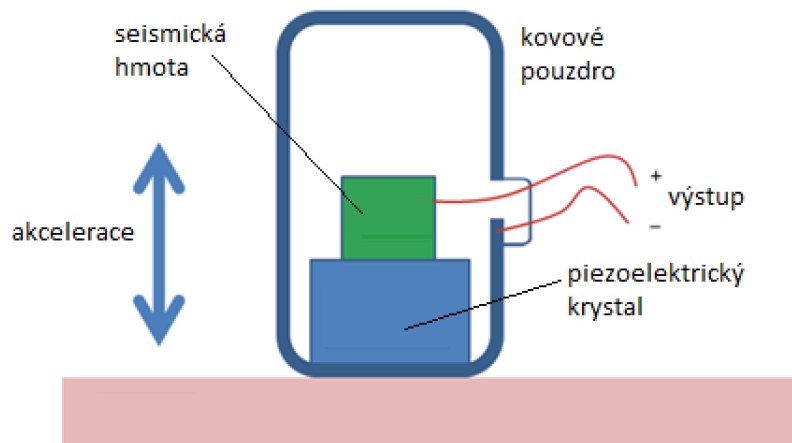
$$a = \frac{dv}{dt} \text{ [m.s}^{-2}\text{]} \quad (11)$$

Pro měření vibrací se v dnešní době velmi často používá měřicí snímač zvaný akcelerometr, který měří zrychlení vibrací. Analogicky lze integrací zrychlení dle času získat rychlost vibrací a integrací rychlosti dle času zase výchylku. Určit rychlost, popřípadě výchylku kmitání, lze také z frekvenčního spektra, kdy se signál zrychlení nejprve rozkládá na jednotlivé harmonické složky. Ve výsledném frekvenčním spektrogramu se přiřazuje každé frekvenci příslušná amplituda. Pro dané frekvence a jim odpovídající amplitudy se dopočítává amplituda rychlosti, popřípadě dráhy. Tímto postupem je získán frekvenční spektrogram rychlosti nebo výchylky. Z frekvenčního spektrogramu se zpětně složí z harmonických složek signál rychlosti. [4]

V současnosti jsou na trhu dostupné zesilovače měřících zařízení vybavené moduly, které uskutečňují integraci přímo v průběhu měření a obsluha si pomocí přepínače může volit mezi měřením dráhy, rychlosti nebo zrychlení. Měření vibrací může probíhat například pomocí piezodoporových (piezorezistivních, tenzometrických), kapacitních nebo piezoelektrických akcelerometrů. V dnešní době se měření velmi často realizuje pomocí piezoelektrických akcelerometrů, které jsou podrobněji popsány v následující podkapitole. [4]

1.4.1 Piezoelektrické akcelerometry

Jak již bylo zmíněno, k měření vibrací se velmi často používá piezoelektrických akcelerometrů. Mezi velké výhody těchto snímačů patří jejich nízká cena a snadné použití. [27]



Obrázek 12 – Schéma piezoelektrického akcelerometru [27]

Tento druh akcelerometru využívá materiály, jako je například křemenný krystal, u kterých dochází k piezoelektrickému jevu. To znamená, že tyto materiály vytvářejí elektrický náboj při jejich deformování. Schéma piezoelektrického akcelerometru se nachází na obrázku číslo 12. Jedna strana piezoelektrického akcelerometru je připevněna ke kovovému pouzdro a druhá je spojena se seismickou hmotou, ke které jsou připojeny vodiče. Rozvibrováním akcelerometru se vytváří síla působící na piezoelektrický krystal, který vlivem účinkování této síly začne vytvářet náboj. V souladu s druhým Newtonovým zákonem je velikost této síly rovna síle, jenž je vyvolaná zrychlením seismické hmoty. Na výstupu se tím vlivem vytváří náboj, jenž je úměrný účinkující síle. Seismická hmota má konstantní hmotnost, takže výstupní náboj je úměrný zrychlení senzoru. [27]

Je celá řada parametrů, které ovlivňují výběr akcelerometru. Mezi tyto parametry patří frekvenční rozsah, hmotnost, citlivost, dynamický rozsah a velikost akcelerometru. Akcelerometry se také odlišují množstvím směrů, ve kterých mohou vibrace měřit. Na trhu se nachází akcelerometry, které umožňují měřit ve značně vysokých teplotách, a to velmi nízkou intenzitu vibrací. Nejdůležitějším parametrem, který ovlivňuje výběr akcelerometru je jeho citlivost. Obvykle platí pravidlo, že čím vyšší je citlivost akcelerometru, tím větší je jeho samotná velikost a hmotnost. To může být problémem při měření vibrací u velmi tenkých předmětů s nízkou hmotností, kde by mohl svou hmotností těžký akcelerometr ovlivnit výsledek měření. Problematika při volbě frekvenčního rozsahu je již podrobněji vyložena výše, ale jeho volbu ovlivňuje i způsob přichycení akcelerometru. [4]

Optimální je akcelerometry umístit co nejblíže k měřenému místu. Přesnost celkového výsledku měření ovlivňuje celá škála faktorů, jako jsou například změny teploty, vlhkost

vzduchu, okolní teplota, koroze, elektromagnetický a akustický šum, vibrace v příčném směru nebo radiace. [4, 22]

Piezoelektrické akcelerometry lze připevnit k měřenému místu šroubovým čepem nebo je upevnit aplikací lepidla. Uplatnění má také použití menšího množství speciálního vosku aplikovaného mezi akcelerometrem a měřeným povrchem. Nevýhodou vosku se stává jeho lepkavost už při teplotě okolo 66 °C. Při vyšších teplotách vosk ztratí svoje spojovací vlastnosti. Vosk při nižších teplotách udrží pouze malé akcelerometry a jenom do úrovně vibrací 18G. Výhodnějšího spojení je možné dosáhnout kyanoakrylátovými lepidly, jelikož velmi rychle tuhnou a poskytují pevné spojení, ale pouze při jejich aplikaci na hladké a neporézní plochy. Pro spojení lze použít také horká lepidla, která jsou vhodná přibližně do 90 °C. Tyto lepidla se aplikují za horka a odstraňují se pomocí horkovzdušné pistole. Nejvýhodnější možností pro připevnění akcelerometru se stávají magnetické držáky, ale jejich použití je omezené na magnetické materiály. Magnetické držáky plní svoji funkci v širokém intervalu teplot. [27]

2 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

V první kapitole této práce jsou vyjmenovány způsoby, jak při obráběcím procesu eliminovat vibrace. Cílem této práce je zjistit, jaký vliv na vibrace měly čtyři různé utvařeče třísky. Experiment probíhal se čtyřmi typy vyměnitelných břitových destiček určených pro soustružení, které jsou kromě různého utvařeče třísky totožné. Tato práce by měla ověřit předchozí experiment, proto byly při soustružení použity stejné VBD, jako v předešlém experimentu. Pro adekvátní ověření bylo důležité zvolit také totožný materiál obrobku, měřicí vybavu a stejně tak použít pro jednotlivá testování obdobné řezné rychlosti, posuvy a hloubku řezu jako v předchozím experimentu. Jedinou změnou tohoto experimentu oproti předešlému testování je použití jiného soustružnického centra. Tato práce tedy nejen ověřuje dříve prodělaný experiment, ale zhodnocuje také vliv použitého stroje na velikost vibrací u různých typů utvařečů třísek.

2.1 Použité prostředky

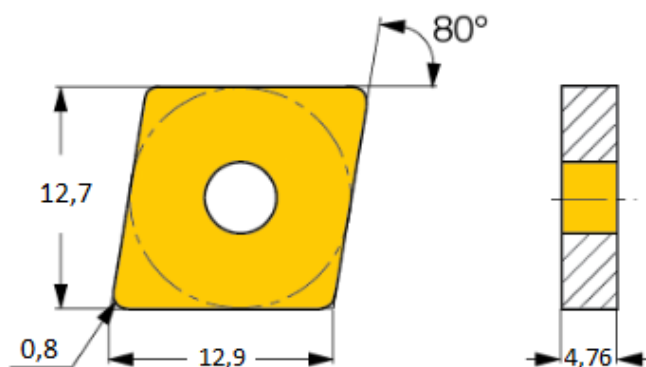
V této kapitole jsou vyjmenovány všechny použité pomůcky a prvky, které byly součástí přípravy, průběhu a vyhodnocení experimentu.

2.1.1 Testované VBD

Na obrázku číslo 13 lze vidět použité vyměnitelné břitové destičky od firmy Iscar. Jak již bylo v práci zmíněno, tak VBD jsou kromě jiného utvařeče třísky totožné. Jedná se o oboustranné 80ti stupňové kosočtvercové VBD. Destičky jsou povlakované metodou CVD složenou z TiCN, TiN a Al₂O₃, díky které vykazují vyšší odolnost proti opotřebení. VBD jsou určeny pro obrábění oceli a všechny mají upínací mechanismus dle normy ISO P. Výhodou tohoto systému je velmi přesné ustanovení a přitažení VBD k opěrným plochám. Výměna VBD s tímto systémem upínání je velmi snadná, rychlá a systém neomezuje odchod třísky. V dalších podkapitolách jsou uvedeny informace o jednotlivých VBD spolu doporučenými řeznými podmínkami. V tabulkách číslo 1 až 4 lze najít doporučené řezné podmínky pro jednotlivé typy destiček. Rozměry VBD typu A, B a C jsou znázorněné na obrázku číslo 14. [28, 29]



Obrázek 13 – Použité VBD



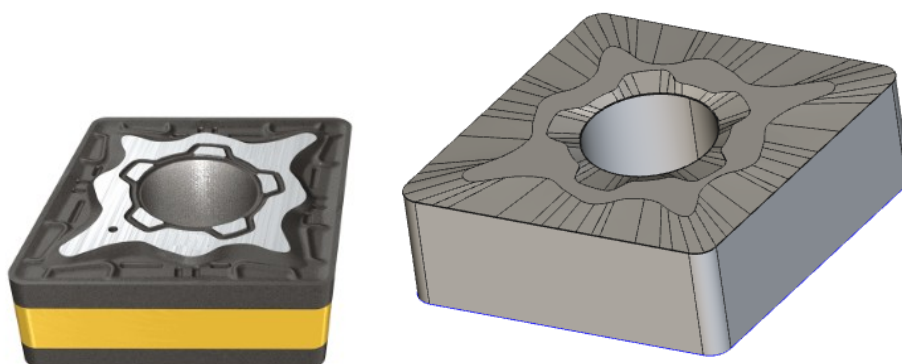
Obrázek 14 – Geometrie VBD typu A, B a C [30]

- VBD destička typu A – CMNG 120408 - M3P**

Na obrázku číslo 15 je vyobrazena VBD typu A. Doporučené řezné podmínky jsou zahrnuty v tabulce číslo 1. VBD je určena pro střední řezné rychlosti a má pozitivní úhel čela, díky kterému je zajištěn tichý řezný proces. [30]

Tabulka 1 – Doporučené řezné podmínky pro VBD typu A [30]

Řezné podmínky	Výrobce doporučené hodnoty
v_c [m.min ⁻¹]	140 až 320
f [mm]	0,15 až 0,50
a_p [mm]	0,50 až 5,50



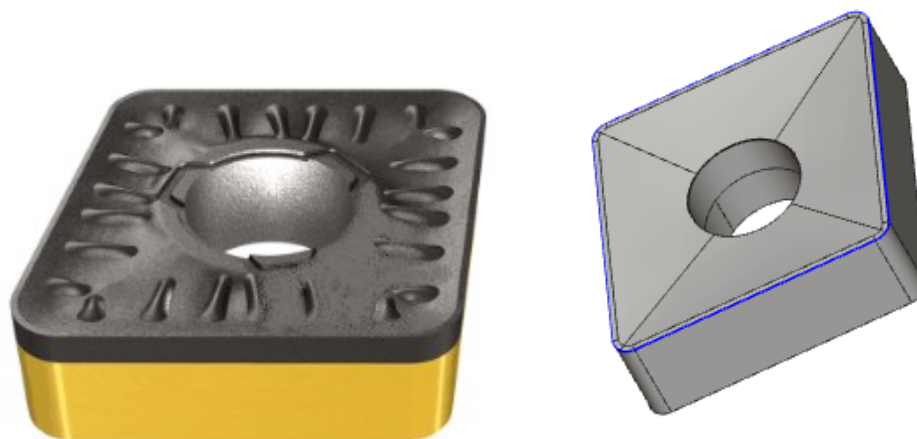
Obrázek 15 – VBD typu A [30]

- VBD destička typu B – CNMM 120408 - R3P

Na obrázku číslo 16 je vyobrazena VBD typu B. Výrobce doporučuje tento typ destičky používat pro hrubovací operace. [31]

Tabulka 2 – Doporučené řezné podmínky pro VBD typu B [31]

Řezné podmínky	Výrobce doporučené hodnoty
v_c [m.min ⁻¹]	140 až 320
f [mm]	0,20 až 0,55
a_p [mm]	0,70 až 7,50



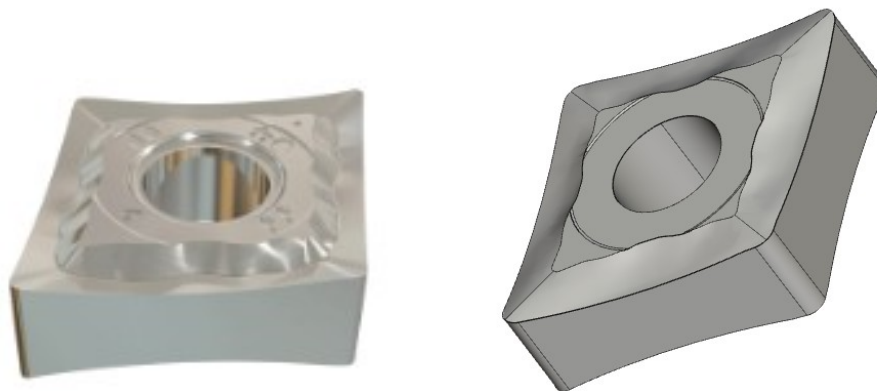
Obrázek 16 – VBD typu B [31]

- VBD destička typu C – CNMG 120408 - PP

Tato VBD s pozitivním úhlem čela je doporučována především pro soustružení tvárných materiálů, jako jsou například slitiny hliníku, nízkouhlíkové oceli, nerezové oceli a žáropevné slitiny. [32]

Tabulka 3 – Doporučené řezné podmínky pro VBD typu C [32]

Řezné podmínky	Výrobce doporučené hodnoty
v_c [m.min ⁻¹]	140 až 320
f [mm]	0,14 až 0,30
a_p [mm]	1 až 4



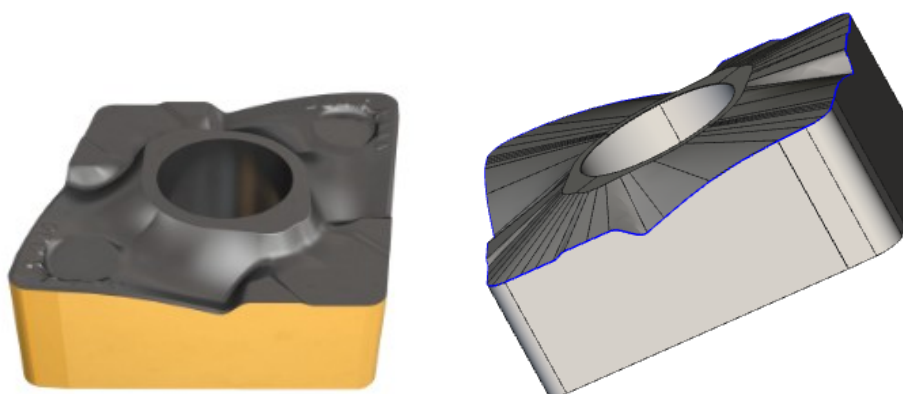
Obrázek 17 – VBD typu C [32]

- VBD destička typu D – CNMM 120408 - M4PW**

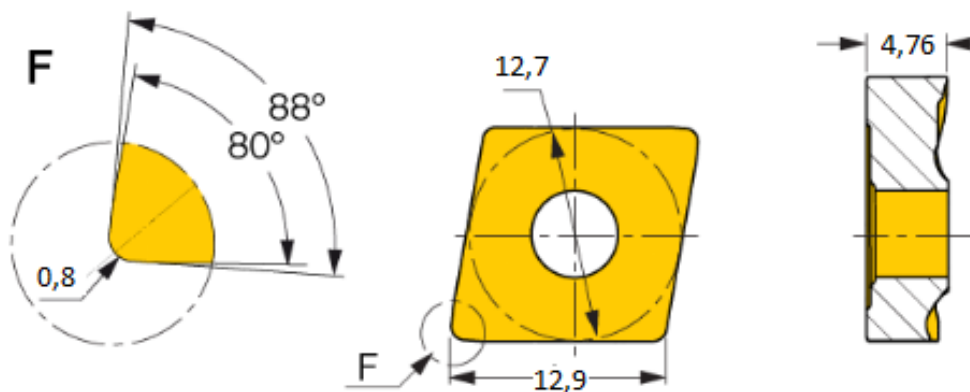
VBD typu D má pozitivní úhel čela a řeznou hranu do šroubovice, která napomáhá snižovat řezné síly při obrábění. Hladicí geometrie této VBD zvyšuje kvalitu obrobene plochy při vyšších posuvech. VBD je vhodná pro těžké obrábění. [33]

Tabulka 4 – Doporučené řezné podmínky pro VBD typu D [33]

Řezné podmínky	Výrobcem doporučené hodnoty
v_c [m.min ⁻¹]	140 až 320
f [mm]	0,24 až 0,59
a_p [mm]	1,5 až 5



Obrázek 18 – VBD typu D [33]



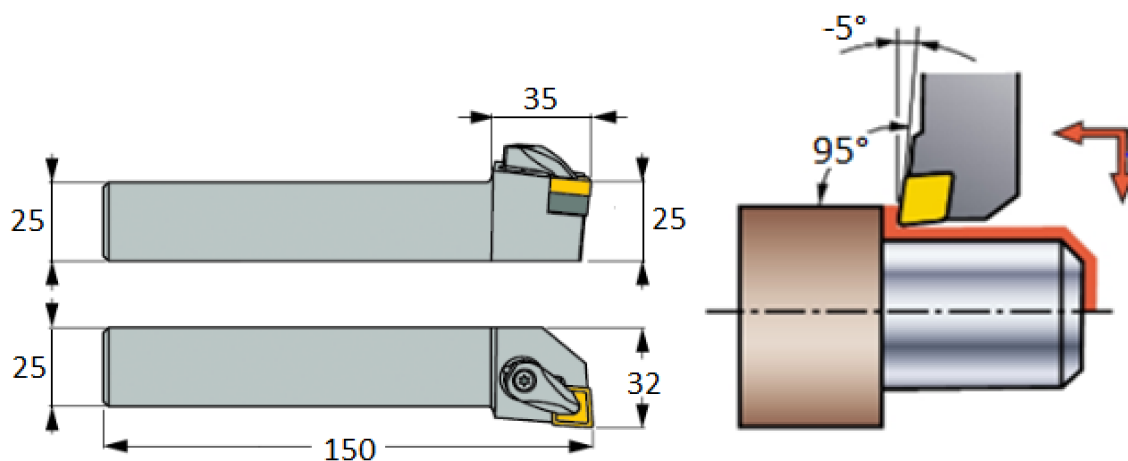
Obrázek 19 – Geometrie VBD typu D [33]

2.1.2 Použitý nástrojový držák

Při experimentu byly VBD upnuty v nožovém držáku označeném DCLNL 2525M-12. Jedná se o levý vnější soustružnický nůž s 95ti stupňovým úhlem nastavení, určeným pro 80ti stupňové VBD. Schéma držáku je uvedeno na obrázku s označením 21. Nástrojový držák umožňuje maximální vyložení 32 mm. Ortogonální úhel čela držáku je 6 stupňů. [35, 36]



Obrázek 20 – Nástrojový držák DCLNL 2525M-12 [34]



Obrázek 21 – Schéma držáku [35, 36]

2.1.3 Obráběný materiál

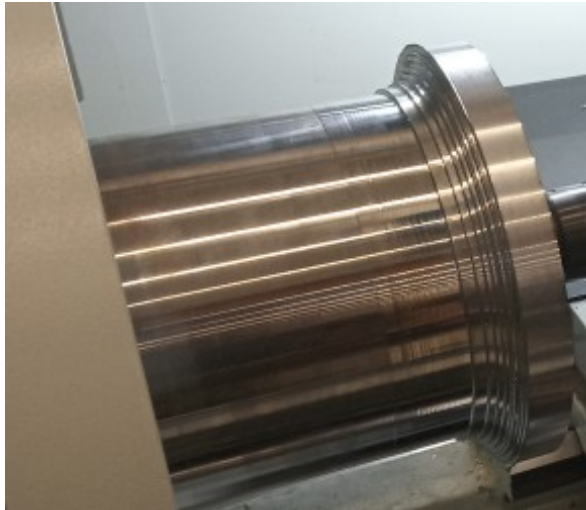
Jako obráběný materiál byla vybrána v současném i předchozím experimentu uhlíková ocel C45 (dle ČSN 12 050). Ocel je zařazena do referenční třídy obrobitelnosti 14b a používá se jako etalon pro určování obrobitelnosti ocelí. Ocel je určena k zušlechťování, k povrchovému kalení a lze ji využít pro výrobu hřídelů těžkých strojů, karuselů, na větší ozubená kola, ojnice, pístnice, vřetena, čepy, šrouby a mnoho dalších strojních součástí. V tabulce číslo 5 a 6 lze vidět mechanické vlastnosti oceli a její chemické složení.

Tabulka 5 – Mechanické vlastnosti oceli C45 [37]

Parametr		Hodnota
Mez pevnosti [MPa]		min. 540
Mez kluzu [MPa]		min. 325
Tažnost [%]		min. 17
Tvrдость [HB]		max. 225
Modul pružnosti v tahu [GPa]		211
Modul pružnosti ve smyku [GPa]		79

Tabulka 6 – Chemické složení oceli C45 (v hm. %) [37]

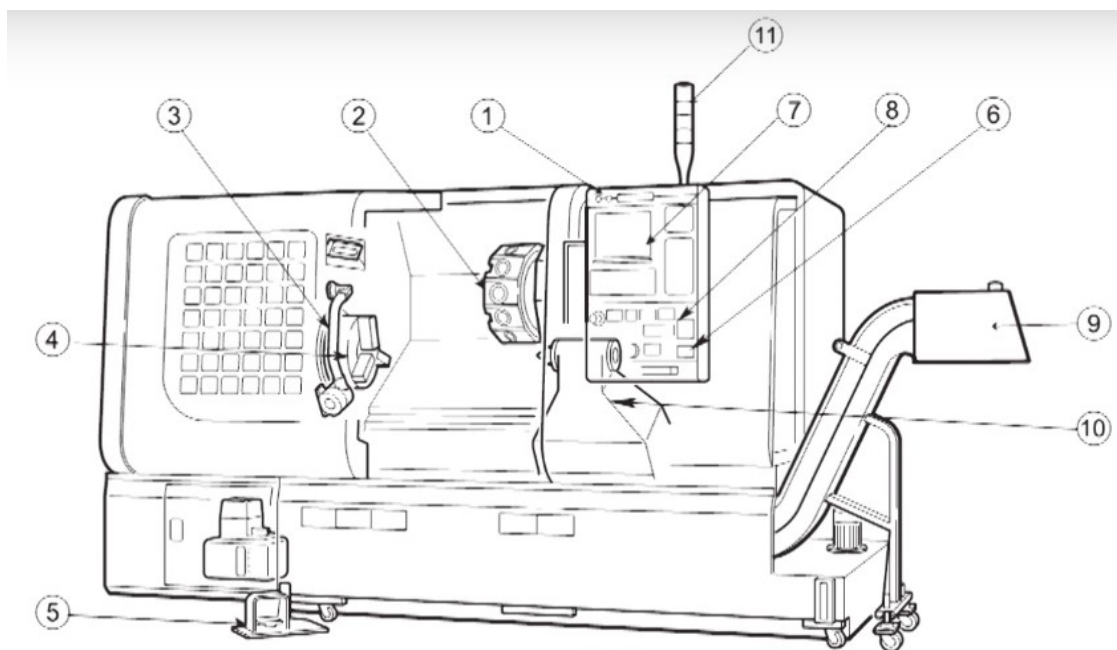
C		Mn		Si		P	S	Cr	Ni	Cu
od	do	od	do	max.		max.	max.	max.	max.	max.
0,42	0,50	0,5	0,8	0,17	0,37	0,04	0,04	0,25	0,30	0,30



Obrázek 22 – Obráběný materiál (ocel C45)

2.1.4 Použitý obráběcí stroj

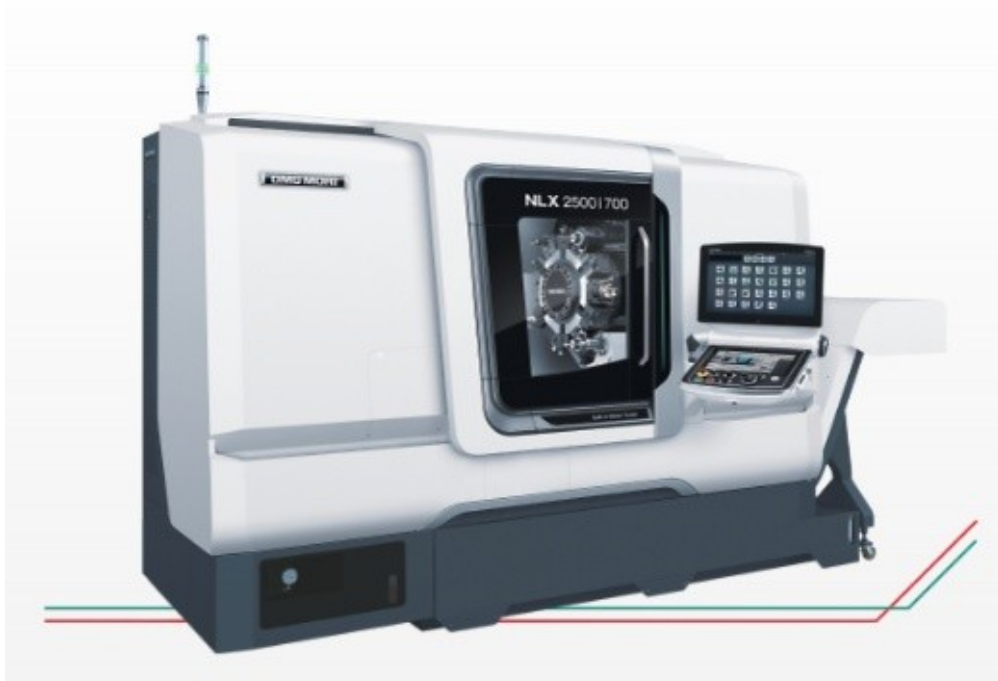
Tato podkapitola je soustředěna na popis a charakteristiku soustružnicko-frézovacího obráběcího centra NLX 2500MC/700 od firmy DMG MORI SEIKY, který byl použit pro tento experiment. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce číslo 7. Centrum má 6 programovatelných os s vysokou přesností a tuhostí. Stroj je vybaven řídicím systémem CELOS, který poskytuje rychlé a snadné programování.



Obrázek 23 – Schéma obráběcího centra NLX 2500MC/700 (1 = tlačítko on/off, 2 = revolverová hlava, 3 = rameno snímače nastavení nástroje, 4 = sklíčidlo, 5 = nožní spínač, 6 = uzamykatelný spínač, 7 = ovládací panel PC, 8 = ovládací panel stroje, 9 = dopravník třísek, 10 = koník, 11 = výstražný maják) [38]

Tabulka 7 – Parametry obráběcího centra NLX 2500MC/700 [39]

Parametr	Hodnota
Maximální průměr soustružení	366 mm
Maximální délka obrobku s koníkem (lze obrábět)	728 mm
Maximální rozměr sklíčidla	254 mm
Max. otáčky motoru vřetena	4 000 ot.min ⁻¹
Max. otáčky motoru vřetena (protivřeteno)	6 000 ot.min ⁻¹
Maximální otáčky nástroje	10 000 ot.min ⁻¹
Výkon pohonu (100 % DC)	22 kW (AC)
Točivý moment (100 % DC)	862 Nm
Maximální průměr použité tyčoviny	102 mm



Obrázek 24 – NLX 2500MC/700 [39]

2.1.5 Použité měřicí zařízení

- **Zesilovač LabAmp 5165A4**

Použité měřicí zařízení lze vidět na obrázku číslo 25. Jedná se o zesilovač od firmy Kistler, LabAmp 5165A4. Tento zesilovač lze použít pro měření dynamických signálů mechanických veličin piezoelektrickými senzory, piezotronovými senzory, popřípadě senzory s výstupem napětí. Piezoelektrické senzory tvoří elektrický náboj, jehož hodnota se mění v přímém poměru k zatížení, které působí na senzor. Zesilovač LabAmp převádí tento náboj přímo na digitální hodnoty nebo proporcionální výstupní napětí. [40]



Obrázek 25 – Měřicí zařízení od firmy Kistler LabAmp 5165A4 [40]

- **Akcelerometry**

Do měřicího zařízení LabAmp byly zapojené dva druhy piezoelektrických akcelerometrů. Jedná se opět o akcelerometry od firmy Kistler. Jak již bylo uvedeno v teoretické části této práce, piezoelektrické akcelerometry využívají materiály, jako je například křemenný krystal, u kterých dochází k piezoelektrickému jevu. To znamená, že tyto materiály vytvářejí elektrický náboj při jejich deformování. Jeden z akcelerometrů, který byl použit, má označení 8702B25T. Akcelerometr lze vidět na obrázku číslo 26 a při měření byl použit jeden kus tohoto typu akcelerometru.



Obrázek 26 – Akcelerometr 8702B25T od firmy Kistler [41]

Druhý akcelerometr má označení 8704B25T a jeho výrobcem je opět firma Kistler. Při měření byly použity dva kusy tohoto typu akcelerometru. Rozdíl mezi tímto a předcházejícím typem akcelerometru je v přiváděném kabelu. Jinak mají akcelerometry stejné parametry, proto jsou v tabulce číslo 8 zahrnuty charakteristiky pro oba dva typy akcelerometrů. Akcelerometry mají magnetický systém upínání, který umožňuje měření v širokém intervalu teplot.



Obrázek 27 – Akcelerometr 8704B25 od firmy Kistler

Tabulka 8 – Parametry použitých akcelerometrů od firmy Kistler [42]

Materiál	Titan
Frekvenční rozsah	1 až 9000 Hz
Rozsah pracovní teploty	-55 ° až 100 °C
Měřicí rozsah	$\pm 250 \text{ m.s}^{-2}$
Citlivost	200 mV/g
Hmotnost	8,6 g

2.1.6 Aplikovaný software

V této části práce jsou představeny programy aplikované při zpracování dat. Samozřejmě, mimo níže vypsany software, byl pro zpracování dat aplikován tabulkový procesor Microsoft Excel 365.

- **LabAmp 516XA Demo**

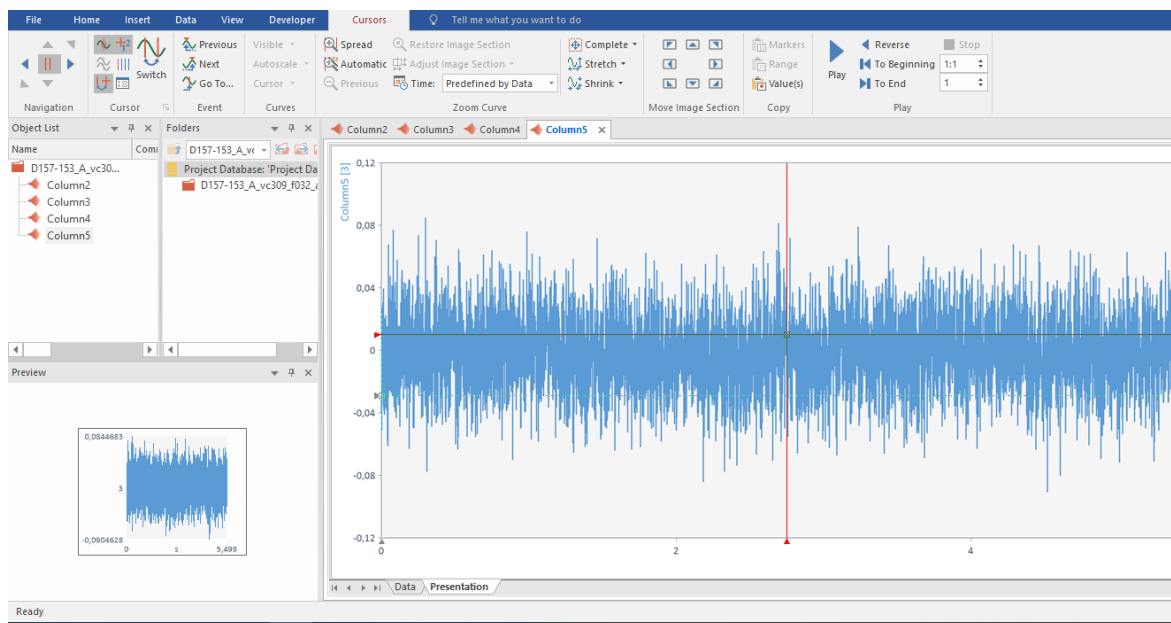
Pro sběr hodnot zrychlení vibrací byl použit software LabAmp 516XA od firmy Kistler. Tento software je v demo verzi dostupný na webových stránkách firmy Kistler a je doporučený při použití zesilovače LabAmp 5165A4. Program umožnil data exportovat do textového editoru, kde se mohly dále zpracovávat.



Obrázek 28 – Prostředí softwaru LabAmp 516XA Demo od firmy Kistler

- **FlexPro Developer Suite 2019**

Spolu se softwarem Microsoft Excel 365 byl pro vyhodnocení dat použit program FlexPro 2019 od firmy Weisang GmbH. Na obrázku číslo 29 je vyobrazeno prostředí tohoto softwaru. Jedná se o program sloužící k analýze a prezentaci dat. FlexPro dokáže zpracovávat velmi rychle velké množství naměřených dat a vypočítat potřebné veličiny rychle a efektivně. Jak lze vidět na obrázku číslo 29, program vyhodnocuje také grafy naměřených veličin, pomocí kterých lze rovněž hodnotit průběh vibrací.



Obrázek 29 – Prostředí programu FlexPro Developer Suite 2019

2.2 Průběh přípravy experimentu

Příprava experimentu začala stanovením řezných podmínek. Řezné podmínky byly zvoleny podle předešlého experimentu, aby došlo k jeho optimálnímu ověření. V tabulkách číslo 9 a 10 lze vidět řezné podmínky tohoto experimentu, kromě hloubky řezu a_p , která má hodnotu 2 mm během celého experimentu. Obráběný materiál měl na začátku experimentu největší průměr okolo 193 mm a poté se s každým testem zmenšoval o 4 mm vzhledem k hloubce řezu. Soustružnický nůž se během testů přesouval k větším průměrům. Vzhledem k tvaru obrobku, viz obrázek 22, jsou průměry při počátečních pokusech vyšší. Otáčky jsou doloženy dle vzorce:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} [\text{min}^{-1}] \quad (12)$$

, kde

v_c je řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],

n jsou otáčky [min^{-1}],

D je průměr obrobku [mm].

Tabulka 9 – Řezné podmínky u soustružení s VBD typu A (vlevo) a B (vpravo)

D [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	f [mm]
193	151	249	0,16
189		254	0,20
185		260	0,24
181		266	0,32
177	209	376	0,16
173		385	0,20
193		345	0,24
189		352	0,32
185	259	446	0,16
181		455	0,20
177		466	0,24
173		477	0,32
169	309	582	0,16
165		596	0,24
161		611	0,2
157		626	0,32

D [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	f [mm]
153	151	314	0,16
149		323	0,20
145		331	0,24
141		341	0,32
137	209	486	0,16
165		403	0,20
161		413	0,24
157		424	0,32
153	259	539	0,16
149		553	0,20
145		569	0,24
141		585	0,32
137	309	718	0,16
162		607	0,20
158		623	0,24
154		639	0,32

Tabulka 10 – Řezné podmínky u soustružení s VBD typu C (vlevo) a D (vpravo)

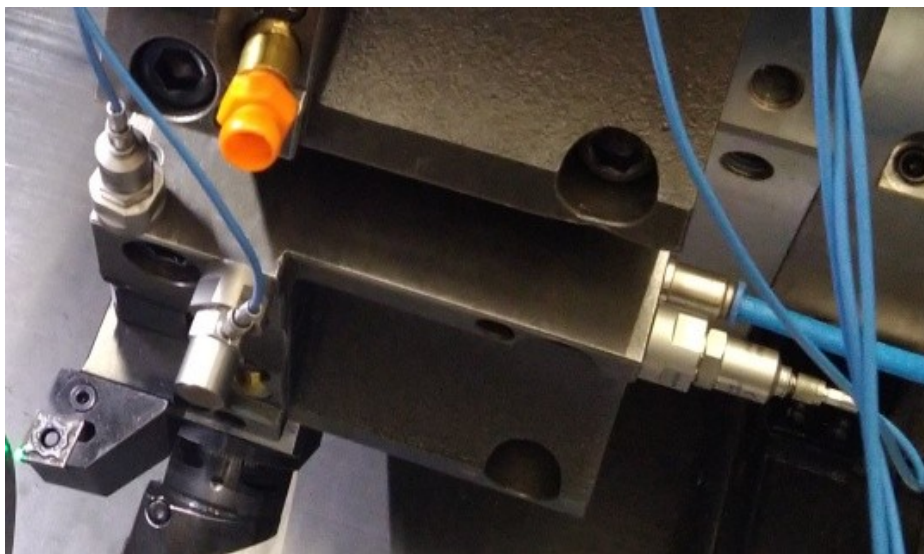
D [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	f [mm]
151	151	318	0,16
146		329	0,20
142		338	0,24
158		304	0,32
162	209	411	0,16
154		432	0,20
150		444	0,24
146		456	0,32
142	259	581	0,16
158		522	0,20
154		535	0,24
150		550	0,32
146	309	674	0,16
142		693	0,20
162		607	0,24
158		623	0,32

D [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	f [mm]
154	151	312	0,16
150		320	0,20
146		329	0,24
142		338	0,32
162	209	411	0,16
158		421	0,20
154		432	0,24
150		444	0,32
146	259	565	0,16
142		581	0,20
162		509	0,24
158		522	0,32
154	309	639	0,16
150		656	0,20
146		674	0,24
142		693	0,32

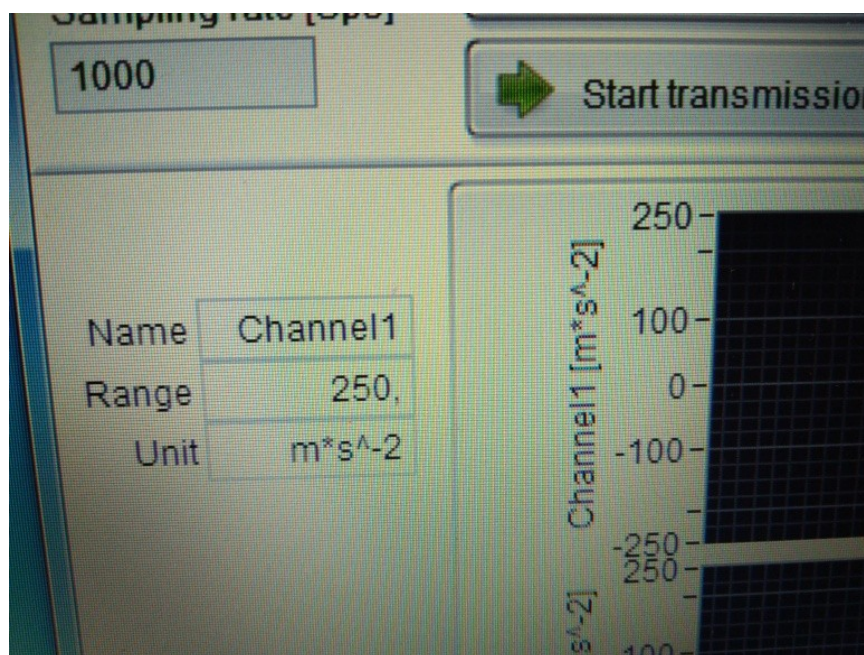
Pro přípravu experimentu se nejprve nachystaly všechny prvky popsané v kapitole 2.1, kromě programu FlexPro a softwaru Microsoft Excel, které sloužily až pro vyhodnocení naměřených dat. Při přípravě se do měřicího zařízení připojily konektory tří akcelerometrů, aby bylo zajištěno měření ve třech osách, viz obrázek 30.

**Obrázek 30 – Připojení akcelerometrů**

Akcelerometry se připevnilly na upínací zařízení pro nožový držák, jak lze vidět na obrázku číslo 31. Bylo důležité označit jednotlivé akcelerometry, tedy směr, který každý akcelerometr měřil, aby se při analýze vibrací přiřadily k naměřeným hodnotám dané směry. Jeden akcelerometr byl umístěn ve směru složky posuvové síly, druhý ve směru hlavní složky řezné síly a poslední akcelerometr byl umístěn ve směru složky pasivní síly. Měřicí zařízení LabAmp se připojilo ethernet kabelem do PC, kde se nachystal program LabAmp 516XA Demo, který byl určen pro sběr dat. Tím byla příprava experimentu dokončena a experiment mohl začít. Na obrázku 32 lze vidět měřicí rozsah daných měření.



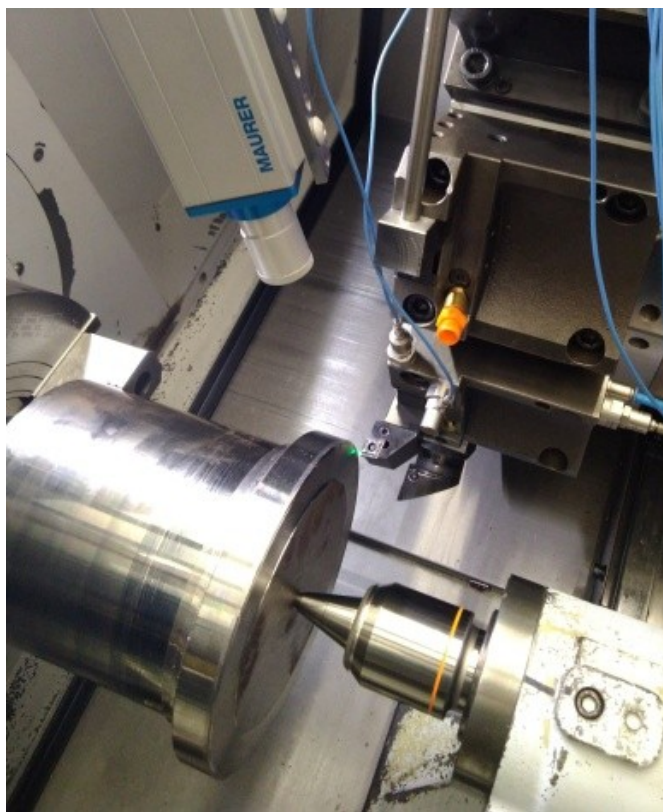
Obrázek 31 – Umístění akcelerometrů



Obrázek 32 – Jednotka a rozsah měření

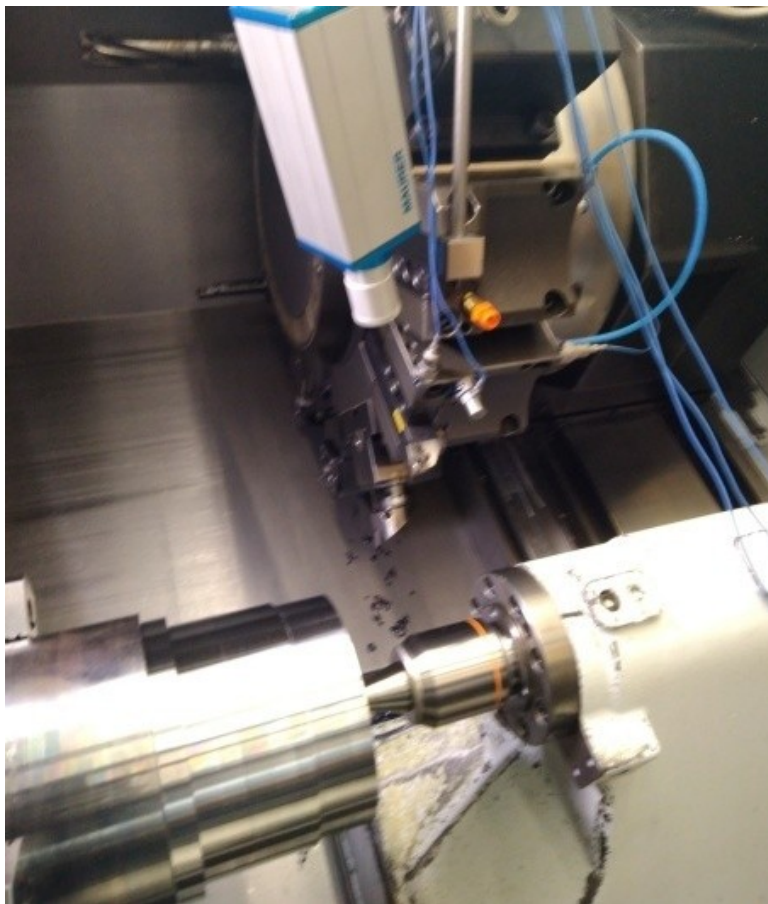
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST, MĚŘENÍ VIBRACÍ

V této kapitole je popsán průběh experimentu. Proces začal upnutím obrobku C45 do sklíčidla soustružnicko-frézovacího centra. Poté byla vložena destička typu A do připraveného držáku. Držák se následně upnul do upínače pro nožový držák. Následovalo nastavení řezné rychlosti na $151 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu na $0,16 \text{ mm}$ a hloubky řezu na 2 mm . Následně za těchto řezných podmínek vyměnitelná břitová destička typu A soustružila podélným řezem délku 10 mm . Tato délka byla zvolena tak, aby čas soustružení trval minimálně dvě sekundy pro dosažení optimálního množství naměřených dat. Jakmile se VBD blížila k prvnímu záběru, bylo potřebné v programu LabAmp 516XA Demo spustit proces měření. Po vyjetí ze záběru se proces sběru hodnot v programu ukončil a naměřené soubory se vyexportovaly do textového editoru pro další zpracování. Na fotografii obrobku lze vidět osazení, které se začalo soustružit jako první.



Obrázek 33 – Začátek experimentu

Celý proces proběhl znovu při stejné řezné rychlosti a hloubce řezu, ale s posuvem $0,20 \text{ mm}$ a poté s posuvem $0,24$ a $0,32 \text{ mm}$. Následovala změna řezné rychlosti na $209 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a opět se proces opakoval pro ty samé čtyři posuvy. Stejný postup proběhl i pro řezné rychlosti 259 a $309 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Následně se vyměnila VBD za destičku typu B a celý výše popsaný proces se opakoval dle tabulky číslo 9. Stejný postup experimentu nastal při soustružení s VBD typu C a D podle tabulky číslo 10.



Obrázek 34 – Průběh experiment

4 VYHODNOCENÍ

Po naměření všech hodnot následovalo jejich vyhodnocení. Pomocí programu LabAmp 516XA Demo byla naměřená data převedena do textového editoru, viz obrázek číslo 35. Na tomto obrázku lze vidět několik řádků naměřených hodnot pro experiment s VBD typu A. Pro každé testování z tabulky číslo 9 a 10 byly do jednotlivých souborů ukládány naměřené hodnoty. Jak lze vidět na obrázku číslo 35, tak akcelerometry naměřily v daném čase čtyři hodnoty, tedy $Y[0]$, $Y[1]$, $Y[2]$, $Y[3]$. Hodnota označená $Y[3]$ odpovídá šumu soustavy, takže touto hodnotou se nadále práce nezabývala. Hodnoty označené $Y[0]$ odpovídají vibracím ve směru složky pasivní síly, hodnoty $Y[1]$ zase vibracím ve směru složky posuvové síly a jako $Y[2]$ jsou označeny vibrace ve směru hlavní složky řezné síly. Hodnoty byly měřeny po 0,001 sekundy a vyhodnocená zrychlení vibrací jsou uvedena v mm.s^{-2} .

D157-153_A_vc309_f032_ap2_t16 – Poznámkový blok

Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda

```
waveform;[0];[1];[2];[3]
t0;24.3.2020 09:47:17,861339;24.3.2020 09:47:17,861339;24.3.2020
09:47:17,861339;24.3.2020 09:47:17,861339
delta t;0,001000;0,001000;0,001000;0,001000

time;Y[0];Y[1];Y[2];Y[3]
24.3.2020 09:47:17,861339;1,634870E-2;5,940029E-2;2,332415E-1;-2,888271E-2
24.3.2020 09:47:17,862339;4,305159E-2;4,686628E-2;-4,032680E-2;-5,122594E-2
24.3.2020 09:47:17,863339;5,449568E-4;-8,773804E-2;6,811959E-2;7,084438E-3
24.3.2020 09:47:17,864339;3,051758E-2;8,719308E-3;-7,847378E-2;-2,016340E-2
24.3.2020 09:47:17,865339;-6,539481E-3;3,705706E-2;-2,070836E-2;3,814697E-3
24.3.2020 09:47:17,866339;4,032680E-2;1,378741E-1;-5,177089E-2;-2,779279E-2
24.3.2020 09:47:17,867339;-2,506801E-2;0,000000E+0;9,209769E-2;2,670288E-2
24.3.2020 09:47:17,868339;3,378732E-2;2,997262E-2;-2,997262E-2;-7,629395E-3
24.3.2020 09:47:17,869339;-1,198905E-2;-2,721781E-3;6,321199E-2;-1,111109E-2
```

Obrázek 35 – Data převedené z LabAmp 516XA Demo

Pro vyhodnocení byla použita hodnota RMS, jelikož tento parametr nejlépe vystihuje daný signál. Jak již bylo zmíněno, hodnota zahrnuje jak amplitudy signálu, tak i celý jeho průběh. Hodnota RMS byla pro srovnávání použita také v experimentu, který tato práce ověřuje, což je další důvod pro použití tohoto parametru. Výsledná hodnota RMS pro každý experiment byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel. Provedla se také kontrola pomocí programu FlexPro.

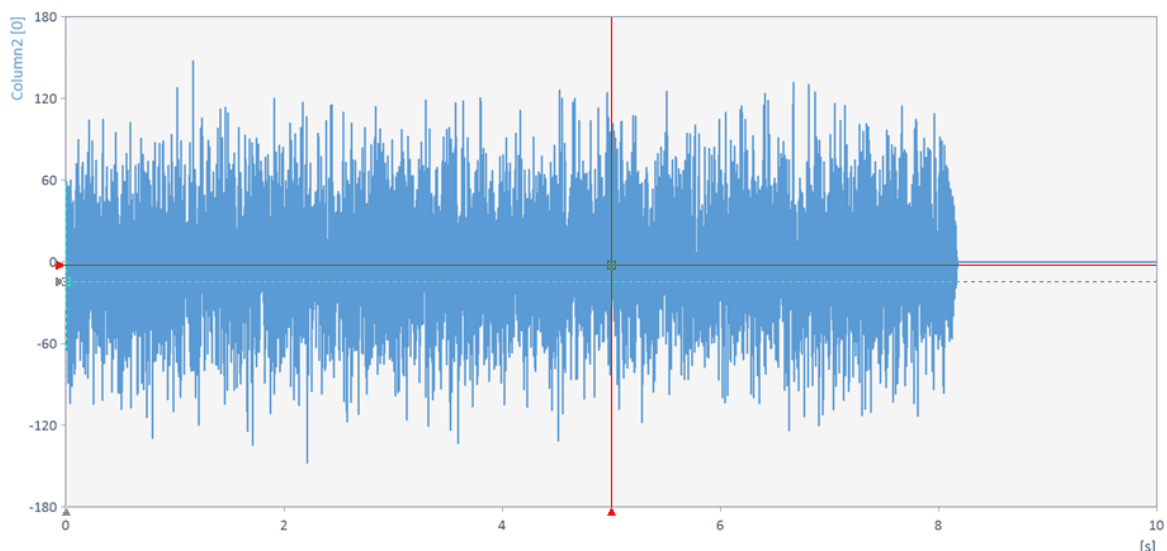
Následně je uveden postup vyhodnocení prvního testování. Další testování se vyhodnocovaly stejným způsobem. Při výpočtu hodnoty RMS v Microsoft Excel se nejprve naměřené hodnoty vložily do tabulky. Následně byl pro všechny osy kromě šumu vykreslen graf. Pro výpočet hodnoty RMS byl použit interval hodnot o délce dvou sekund z ustáleného řezu. Z daného intervalu byla hodnota RMS pro daný směr vibrací vypočítána dle vzorce:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{|\{x_i\}|}} \text{ [mm.s}^{-2}\text{]} \quad (13)$$

, kde

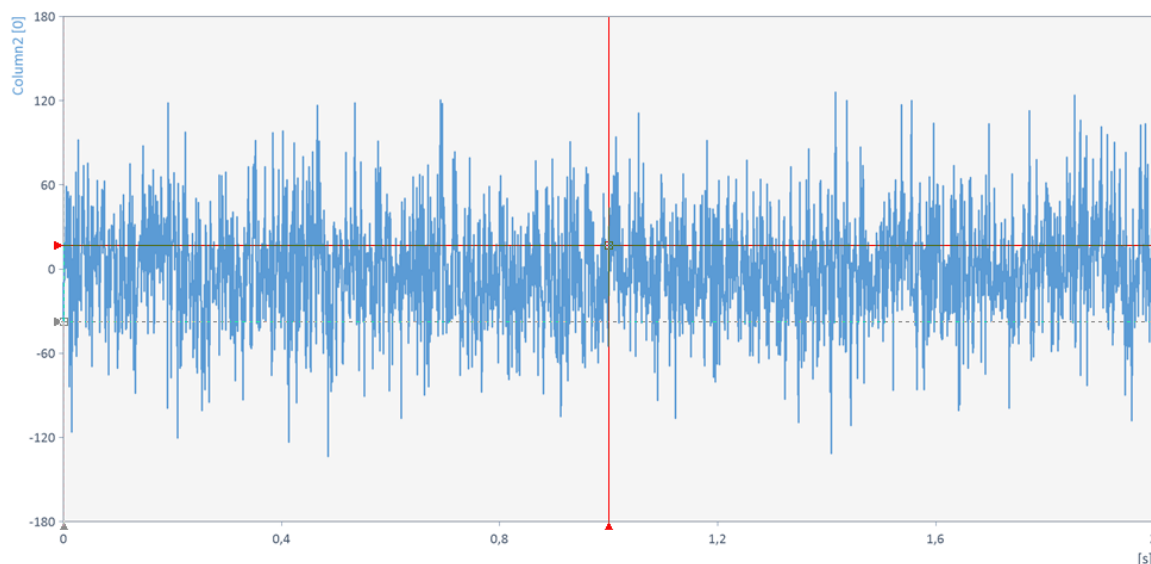
x_i jsou naměřená zrychlení vibrací [m.s⁻²].

Pro ověření správnosti výpočtu byl použit program FlexPro. Textový dokument byl nejprve importován do programu FlexPro 2019. Program pomocí hodnot vytvořil čtyři grafy vibrací. Graf šumu byl následně odstraněn. Na obrázku číslo 36 lze vidět vibrace vznikající při soustružení s VBD typu A (řezná rychlost 151 m.min⁻¹, posuv 0,16 mm a hloubka řezu 2 mm) ve směru F_p.



Obrázek 36 – Příklad grafu naměřených zrychlení vibrací z prvního testování s VBD typu A ve směru osy F_p

Poté byl zvolen interval hodnot odpovídající vyhodnocování v Excelu, viz výše. V programu FlexPro 2019 po výběru intervalu, kliknutím na funkci „Root mean square“ byla dopočítána hodnota RMS pro daný směr hodnoceného experimentu. Stejný proces proběhl pro další směry vibrací a následně pro další testování.



Obrázek 37 – Vybraný interval z naměřených hodnot zrychlení vibrací z prvního testování s VBD typu A ve směru osy F_p

4.1 Vyhodnocení vlivu stroje na velikost vibrací [43]

V této kapitole jsou uvedeny výsledné RMS jednotlivých testování. Kapitola zahrnuje také odpovídající výsledky z minulého experimentu pro otestování vlivu stroje. V minulém testování byl pro experiment použit univerzální soustruh Trens SN 50 C.

4.1.1 Hodnoty RMS při soustružení VBD typu A

Tabulka 11 – VBD A, $v_c = 151 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>51,735</u>	<u>53,293</u>	<u>55,035</u>	<u>56,089</u>	15,104	17,159	17,168	15,824
F_f	<u>10,249</u>	<u>11,752</u>	<u>11,892</u>	<u>14,169</u>	13,818	14,972	15,099	12,117
F_p	<u>39,299</u>	<u>43,019</u>	<u>44,440</u>	<u>52,52</u>	11,79	12,77	14,748	13,102

Tabulka 12 – VBD A, $v_c = 209 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>63,830</u>	<u>70,529</u>	<u>75,058</u>	<u>91,580</u>	6,865	11,738	12,233	19,625
F_f	<u>15,254</u>	<u>15,598</u>	<u>17,505</u>	<u>26,659</u>	7,482	12,387	12,614	18,714
F_p	<u>40,751</u>	<u>56,758</u>	<u>62,657</u>	<u>79,919</u>	5,431	9,798	12,66	23,238

Tabulka 13 – VBD A, $v_c = 259 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>66,298</u>	<u>67,169</u>	<u>76,513</u>	<u>94,428</u>	10,91	12,781	14,765	16,476
F_f	<u>15,324</u>	<u>17,101</u>	<u>20,570</u>	<u>24,428</u>	12,443	14,028	15,17	18,132
F_p	<u>36,491</u>	<u>49,122</u>	<u>67,385</u>	<u>123,169</u>	8,722	10,546	11,94	17,666

Tabulka 14 – VBD A, $v_c = 309 \text{ m.min}^{-1}$

f [mm]	RMS [mm.s ⁻²]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F _c	<u>48,373</u>	<u>67,931</u>	<u>91,177</u>	<u>97,711</u>	11,662	17,652	21,36	25,85
F _f	<u>13,184</u>	<u>16,050</u>	<u>21,648</u>	<u>30,495</u>	11,45	18,07	20,542	21,429
F _p	<u>37,426</u>	<u>46,175</u>	<u>55,525</u>	<u>94,758</u>	9,516	13,792	15,382	22,393

Při řezné rychlosti 151 m.min^{-1} vznikaly při aktuálním experimentu u všech nastavených posuvů značně vyšší vibrace ve směru hlavní složky řezné síly. Stejný případ nastal při použití ostatních řezných rychlostí. Z toho plyne, že soustružnické centrum NLX 2500MC/700 způsobuje větší vibrace ve směru hlavní složky řezné síly oproti soustruhu použitým při minulém experimentu u soustružení s VBD typu A. Ke stejnému závěru došlo také u vibrací vznikajících ve směru složky síly pasivní. U vibrací působících ve směru složky posuvové síly se situace lišila. Ve většině případů opět použití hrotového soustruhu Trens SN 50 C vedlo k menším vibracím, ale rozdíly nebyly tak značné. Soustruh NLX měl pozitivní vliv na vibrace ve směru posuvu při řezné rychlosti 151 m.min^{-1} s posuvy 0,16 mm, 0,20 mm a 0,24 mm. Stejně tak použití nejvyšší řezné rychlosti s posuvem 0,20 mm vedlo k menším vibracím ve směru posuvu u aktuálního experimentu. Z výše uvedených měření je zřejmé, že použitý soustruh měl velký vliv na velikost vibrací u zkoumané VBD, zejména na velikost vibrací vznikajících ve směru hlavní složky řezné síly a ve směru složky pasivní síly. U aktuálního experimentu při soustružení s VBD typu A se vibrace ve všech směrech zvyšovaly s rostoucím posuvem.

4.1.2 Hodnoty RMS při soustružení VBD typu B

Tabulka 15 – VBD B, $v_c = 151 \text{ m.min}^{-1}$

f [mm]	RMS [mm.s ⁻²]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F _c	<u>70,068</u>	<u>50,697</u>	<u>56,419</u>	<u>58,059</u>	32,542	24,272	19,685	19,123
F _f	<u>15,291</u>	<u>16,219</u>	<u>17,721</u>	<u>20,383</u>	30,024	23,202	16,727	15,49
F _p	<u>55,547</u>	<u>72,723</u>	<u>72,160</u>	<u>81,455</u>	19,088	17,048	14,598	16,787

Tabulka 16 – VBD B, $v_c = 209 \text{ m.min}^{-1}$

f [mm]	RMS [mm.s ⁻²]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F _c	<u>66,244</u>	<u>72,109</u>	<u>86,177</u>	<u>90,762</u>	16,713	19,289	24,024	23,812
F _f	<u>21,302</u>	<u>22,492</u>	<u>26,139</u>	<u>29,027</u>	19,074	19,357	20,735	21,695
F _p	<u>77,457</u>	<u>73,106</u>	<u>61,670</u>	<u>109,613</u>	13,304	16,581	21,495	22,679

Tabulka 17 – VBD B, $v_c = 259 \text{ m.min}^{-1}$

f [mm]	RMS [mm.s ⁻²]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F _c	<u>60,361</u>	<u>74,213</u>	<u>86,617</u>	<u>104,268</u>	13,062	16,882	17,92	24,573
F _f	<u>19,509</u>	<u>21,491</u>	<u>26,942</u>	<u>29,695</u>	15,681	19,538	20,64	25,279
F _p	<u>93,874</u>	<u>126,189</u>	<u>90,392</u>	<u>59,477</u>	12,352	13,78	14,128	24,275

Tabulka 18 – VBD B, $v_c = 309 \text{ m.min}^{-1}$

f [mm]	RMS [mm.s ⁻²]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F _c	<u>50,771</u>	<u>68,864</u>	<u>85,796</u>	<u>111,829</u>	13,502	17,756	21,815	27,856
F _f	<u>18,260</u>	<u>22,733</u>	<u>28,850</u>	<u>30,076</u>	13,858	19,963	21,663	22,794
F _p	<u>37,463</u>	<u>107,288</u>	<u>93,302</u>	<u>87,020</u>	12,837	15,525	17,761	17,31

Všechny aplikované řezné rychlosti vedly u aktuálního soustružení s VBD typu B k výrazně rozsáhlejší vibracím ve směru hlavní a pasivní složky řezné síly oproti předchozímu experimentu. Ve směru posuvové složky řezné síly rozdíly ve velikosti vibrací mezi experimenty opět nebyly tak značné. Ve většině případů docházelo k menším vibracím ve směru posuvové složky řezné síly v minulém experimentu, ale při řezné rychlosti 151 m.min^{-1} s posuvy 0,16 mm a 0,20 mm docházelo k menším vibracím u aktuálního experimentu. Lze shrnout negativní působení aktuálního soustruhu na velikost vibrací ve směru hlavní složky řezné síly, ve směru složky pasivní síly a ve většině případů, i když v menší míře ve směru složky posuvové řezné síly.

4.1.3 Hodnoty RMS při soustružení VBD typu C

Tabulka 19 – VBD C, $v_c = 151 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>38,233</u>	<u>35,830</u>	<u>36,514</u>	<u>30,971</u>	14,396	17,555	16,994	18,64
F_f	<u>14,954</u>	<u>14,189</u>	<u>18,403</u>	<u>16,855</u>	10,196	11,191	11,416	14,039
F_p	<u>30,500</u>	<u>28,748</u>	<u>26,858</u>	<u>23,861</u>	10,346	11,327	11,346	15,355

Tabulka 20 – VBD C, $v_c = 209 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>41,072</u>	<u>52,149</u>	<u>57,417</u>	<u>64,411</u>	12,066	13,487	16,588	54,054
F_f	<u>17,470</u>	<u>24,548</u>	<u>30,321</u>	<u>35,715</u>	11,786	13,381	16,38	46,359
F_p	<u>29,839</u>	<u>37,535</u>	<u>43,096</u>	<u>46,336</u>	11,06	14,396	20,378	49,237

Tabulka 21 – VBD C, $v_c = 259 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>49,168</u>	<u>52,883</u>	<u>57,011</u>	<u>81,740</u>	14,417	18,565	16,32	19,022
F_f	<u>23,531</u>	<u>24,631</u>	<u>23,574</u>	<u>40,995</u>	13,853	15,279	15,243	19,376
F_p	<u>35,355</u>	<u>40,653</u>	<u>41,496</u>	<u>57,662</u>	12,021	13,209	14,706	23,422

Tabulka 22 – VBD C, $v_c = 309 \text{ m.min}^{-1}$

f [mm]	RMS [mm.s ⁻²]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F _c	<u>36,577</u>	<u>58,647</u>	<u>63,047</u>	<u>92,579</u>	13,165	19,16	21,113	43,328
F _f	<u>18,113</u>	<u>27,298</u>	<u>34,189</u>	<u>38,488</u>	15,938	22,476	19,178	26,663
F _p	<u>36,777</u>	<u>38,464</u>	<u>40,717</u>	<u>51,702</u>	10,338	14,595	16,855	24,251

Při soustružení s VBD typu C se opět vyskytovaly větší vibrace ve všech směrech oproti předchozímu experimentu. Výjimkou se staly vibrace ve směru posuvové a pasivní složky řezné síly, ke kterým docházelo soustružením řeznou rychlostí 209 m.min^{-1} s posuvem 0,32 mm. Lze vyhodnotit negativní vliv soustružnického centra NLX 2500MC/700 na velikost vibrací u testování VBD typu C. Ve směru posuvové složky řezné síly jsou opět rozdíly mezi vibracemi aktuálního a předchozího experimentu menší než u ostatních směrů vibrací.

4.1.4 Hodnoty RMS při soustružení VBD typu D

Tabulka 23 – VBD D, $v_c = 151 \text{ m.min}^{-1}$

f [mm]	RMS [mm.s ⁻²]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F _c	<u>34,371</u>	<u>41,107</u>	<u>42,154</u>	<u>44,857</u>	21,106	17,316	14,299	16,002
F _f	<u>13,484</u>	<u>16,159</u>	<u>18,190</u>	<u>21,618</u>	17,148	12,263	10,557	12,586
F _p	<u>24,128</u>	<u>27,597</u>	<u>28,154</u>	<u>31,699</u>	12,682	11,189	11,271	15,6

Tabulka 24 – VBD D , $v_c = 209 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>41,635</u>	<u>59,563</u>	<u>62,035</u>	<u>66,332</u>	10,697	12,728	15,632	39,221
F_f	<u>17,163</u>	<u>23,577</u>	<u>25,311</u>	<u>27,587</u>	11,418	13,598	14,525	30,608
F_p	<u>35,809</u>	<u>47,540</u>	<u>48,971</u>	<u>48,898</u>	9,887	11,243	16,343	39,461

Tabulka 25 – VBD D , $v_c = 259 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>44,813</u>	<u>54,825</u>	<u>68,135</u>	<u>80,317</u>	10,773	12,694	14,907	18,84
F_f	<u>17,299</u>	<u>21,559</u>	<u>24,936</u>	<u>33,359</u>	12,988	15,241	17,152	21,511
F_p	<u>36,993</u>	<u>44,802</u>	<u>52,118</u>	<u>64,362</u>	9,15	10,889	12,429	22,197

Tabulka 26 – VBD D , $v_c = 309 \text{ m.min}^{-1}$

	RMS [mm.s^{-2}]							
	Aktuální experiment				Předchozí experiment			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
F_c	<u>42,041</u>	<u>54,707</u>	<u>61,971</u>	<u>91,741</u>	11,799	15,162	18,236	27,204
F_f	<u>18,351</u>	<u>24,068</u>	<u>27,421</u>	<u>30,705</u>	12,502	15,816	19,725	20,987
F_p	<u>36,038</u>	<u>44,285</u>	<u>49,633</u>	<u>64,194</u>	10,188	12,424	15,895	17,524

Opět lze potvrdit značný vliv stroje na velikost vibrací. Soustruh, který se stal součástí nynějšího experimentu, způsoboval větší vibrace. Výjimkou se stalo soustružení řeznou rychlostí 151 m.min^{-1} s posuvem 0,16 mm a při řezné rychlosti 209 m.min^{-1} s posuvem 0,32 mm, kdy zrychlení vibrací ve směru posuvové složky řezné síly dosahovaly nižších hodnot u aktuálního experimentu.

4.2 Srovnání vibrací vznikajících při soustružení jednotlivými VBD

V této kapitole se nachází srovnání vibrací, které vznikají při soustružení jednotlivými VBD. Při srovnání VBD bylo postupováno stejně, jako v předcházejícím experimentu. VBD byly porovnávány podle parametru RMS, ale už ne v jednotlivých směrech. Pro srovnání byla použita výslednice ze tří směrů pro dané řezné podmínky, tedy vibrací ve směru hlavní složky řezné síly, vibrací ve směru složky posuvové síly a vibrací ve směru složky pasivní síly. Výpočet byl proveden dle vzorce:

$$RMS F = \sqrt{RMS F_c^2 + RMS F_f^2 + RMS F_p^2} \text{ [mm.s}^{-2}\text{]} \quad (14)$$

Toto zjednodušení pro srovnání jednotlivých VBD bylo použito kvůli jeho aplikaci v předešlém experimentu. Tím pádem lze optimálně srovnat nynější vypočítané hodnoty s předešlým experimentem. Jelikož by se při porovnání jednotlivých směrů pracovalo s velkým množstvím dat, tak je tento způsob výhodný i z tohoto hlediska. V tabulce číslo 27 se nachází hodnoty RMS F aktuálního a předchozího experimentu.

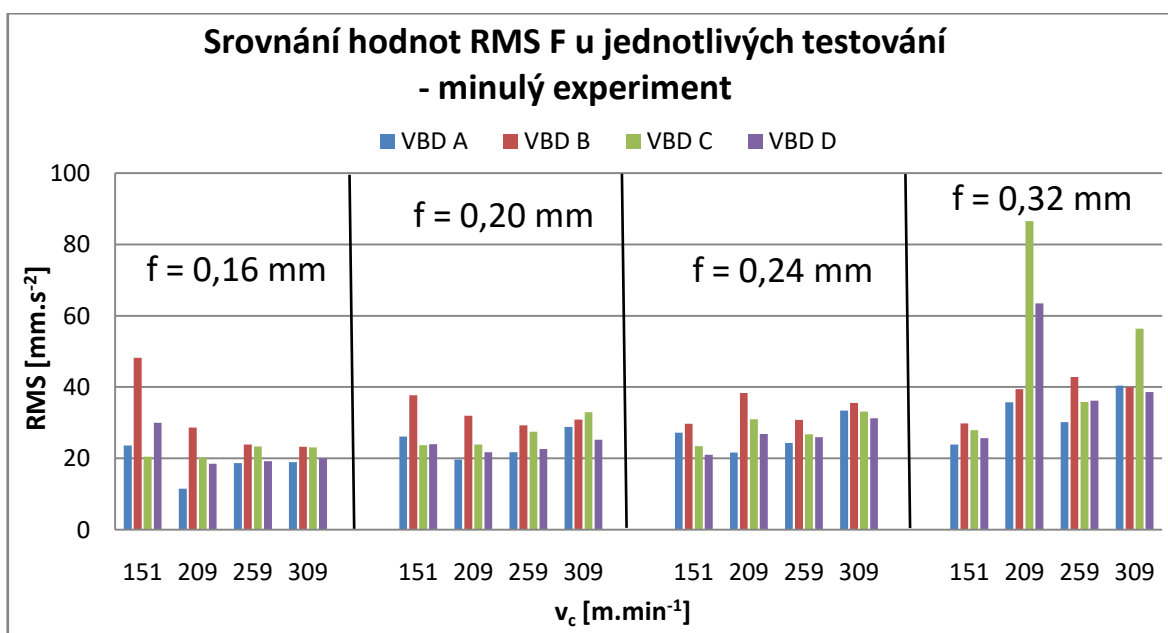
Tabulka 27 – Výsledné hodnoty RMS F pro předchozí a aktuální experiment [43]

	RMS F [mm.s ⁻²]							
	Předchozí experiment				Aktuální experiment			
VBD	VBD A				VBD A			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
$v_c=151 \text{ m.min}^{-1}$	23,624	26,109	27,207	23,851	65,772	69,491	71,73	78,135
$v_c=209 \text{ m.min}^{-1}$	11,515	19,678	21,657	35,712	77,25	91,865	99,328	124,437
$v_c=259 \text{ m.min}^{-1}$	18,706	21,711	24,304	30,205	77,213	84,953	104,01	157,111
$v_c=309 \text{ m.min}^{-1}$	18,912	28,781	33,389	40,359	62,565	83,692	108,926	139,487
VBD	VBD B				VBD B			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
$v_c=151 \text{ m.min}^{-1}$	48,216	37,658	29,671	29,79	90,712	90,121	93,297	102,085
$v_c=209 \text{ m.min}^{-1}$	28,638	31,964	38,329	39,396	104,124	105,119	109,147	145,242
$v_c=259 \text{ m.min}^{-1}$	23,855	29,268	30,769	42,803	113,298	147,964	128,059	123,657
$v_c=309 \text{ m.min}^{-1}$	23,219	30,9	35,505	39,939	65,685	129,499	129,994	144,854
VBD	VBD C				VBD C			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
$v_c=151 \text{ m.min}^{-1}$	20,451	23,701	23,406	27,934	51,143	48,079	48,922	42,575
$v_c=209 \text{ m.min}^{-1}$	20,17	23,837	30,963	86,575	53,688	68,782	77,931	87,013
$v_c=259 \text{ m.min}^{-1}$	23,329	27,433	26,739	35,859	64,97	71,105	74,35	108,106
$v_c=309 \text{ m.min}^{-1}$	23,113	32,944	33,131	56,359	54,941	75,261	82,472	112,807
VBD	VBD D				VBD D			
f [mm]	0,16	0,20	0,24	0,32	0,16	0,20	0,24	0,32
$v_c=151 \text{ m.min}^{-1}$	30,006	23,988	21,046	25,648	44,106	52,082	53,856	59,028
$v_c=209 \text{ m.min}^{-1}$	18,508	21,756	26,878	63,5	57,535	79,772	82,989	86,902
$v_c=259 \text{ m.min}^{-1}$	19,196	22,627	25,902	36,199	60,63	74,012	89,334	108,194
$v_c=309 \text{ m.min}^{-1}$	19,983	25,187	31,213	38,569	58,335	74,386	83,998	116,104

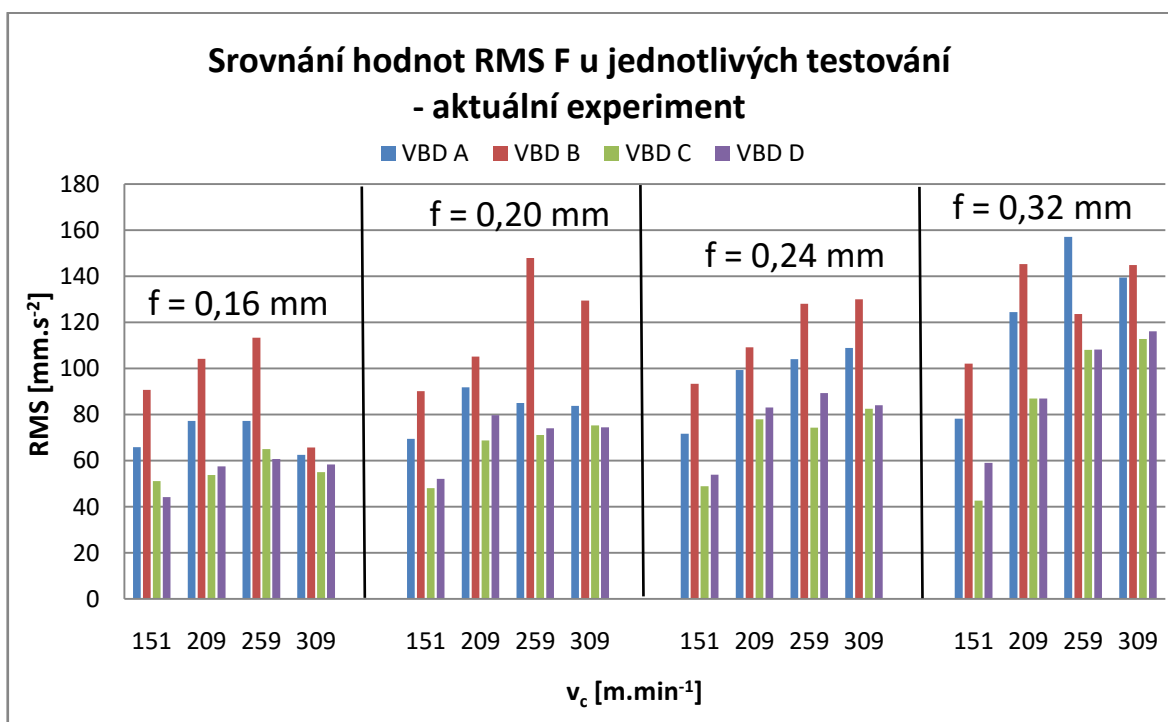
V tabulce číslo 27 lze vidět vypočítané výslednice RMS F [mm.s⁻²] pro aktuální a předchozí experiment. Pro lepší orientaci byly vytvořeny také grafy (viz graf číslo 1 a 2) pro oba dva experimenty. Celkově lze vyhodnotit, že utvařecí třísky měly za aplikovaných řezných podmínek v minulém i současném experimentu na velikost vibrací vliv. Samozřejmě, jak lze vidět v grafech níže, tak při srovnání odpovídajících testování všech VBD se rozdíly mezi velikostmi vibrací liší a v některých testování se jedná pouze o malé rozdíly. V aktuálním experimentu například VBD typu C a D měly za daných řezných podmínek podobný vliv na velikost zrychlení vibrací. Při srovnání jednotlivých VBD v obou experimentech docházelo k větším rozdílům ve velikosti vibrací v aktuálním experimentu, ale toto tvrzení neplatí pro každé srovnání. Pokud se hodnotí pouze to, jestli každý utvařecí třísky působí na velikost vibrací jinak, tak lze uzavřít, že utvařecí třísky má na velikost vibrací vliv, jehož míra závisí na aplikovaných řezných podmínkách.

Při bližším porovnávání hodnot sice má utvařecí třísky vliv na rozsah vibrací, ale z obou experimentů nelze určit pro všechny VBD, jestli se jedná o kladný nebo záporný vliv. Například pokud je srovnávána VBD typu A a B, tak v aktuálním i předchozím experimentu vykazovalo soustružení s VBD typu B ve většině testování vyšší vibrace oproti VBD A. Ale pokud je srovnávána VBD A a VBD typu C, tak vlivy destiček se liší. V předchozím experimentu soustružení s VBD typu A vedlo k nižším vibracím při posuvech 0,2 mm (kromě experimentu s řeznou rychlostí 151 m.min⁻¹), 0,24 mm (opět kromě soustružení řeznou rychlostí 151 m.min⁻¹) a 0,32 mm, než u obrábění s VBD typu C. V aktuálním experimentu, ale při těchto testováních vykazoval proces s VBD typu C menší vibrace oproti soustružení s VBD typu A. Lze doporučit další testování nejlépe na jednom ze soustružnických center, které byly použity v minulém nebo současném experimentu pro ověření výzkumu. Podle vyhodnocených dat má utvařecí třísky na velikost vibrací vliv, ale charakter vlivu je ve vztahu s použitým soustružnickým centrem.

V aktuálním experimentu bylo dosaženo nejvyšších vibrací při testování VBD typu A řeznou rychlostí 259 m.min⁻¹ s posuvem 0,32 mm. Soustružení s VBD typu C a D vedlo k podobným vibracím při posuvu 0,32 mm (mimo experimentu s řeznou rychlostí 151 m.min⁻¹). To nelze uvést u předchozího experimentu, kdy se vyskytl značný rozdíl mezi vibracemi u soustružení s VBD typu C a D při experimentu s řeznou rychlostí 209 m.min⁻¹ s posuvem 0,32 mm, kdy se dosáhlo značně většího vibrování při soustružení s VBD typu C.



Graf 1 – Srovnání hodnot RMS F u jednotlivých testování - minulý experiment [43]



Graf 2 – Srovnání hodnot RMS F u jednotlivých testování - aktuální experiment

5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala sledováním vlivu utvařeče třísky na vibrace při soustružení. Cílem bylo rovněž zjistit, zda má použité soustružnické centrum při použití daných VBD vliv na vibrace při soustružení. Tato práce ověřuje předchozí experiment, který proběhl za stejných podmínek, ale proces soustružení probíhal na jiném centru k ověření vlivu stroje. Studie proběhla se čtyřmi typy VBD, které jsou totožné, kromě odlišného utvařeče třísky. Tyto VBD, za daných řezných podmínek, postupně soustružily ocel a pomocí tří akcelerometrů umístěných na upínači pro nožový držák byly měřeny vibrace ve směru hlavní složky řezné síly, ve směru posuvové složky řezné síly a ve směru složky pasivní řezné síly. Následně se pro tyto směry všech testování zvolil z naměřených dat interval o délce dvou sekund z ustáleného řezu, pro který se vypočítala hodnota RMS. Hodnoty byly srovnávány s výsledky z minulého experimentu a následně byl vyhodnocen vliv stroje na velikost vibrací. Poté byla z měřených směrů pro každé testování vypočítána výslednice RMS F, pomocí které byl hodnocen vliv utvařeče třísky na vibrace při soustružení. Rovněž jsou uvedeny výslednice RMS F z předchozího testování pro analýzu vlivu utvařeče třísky.

Lze vyhodnotit značný vliv stroje na velikost vibrací ve směru hlavní složky řezné síly a ve směru složky síly pasivní. Soustružením na centru NLX docházelo v těchto směrech k větším vibracím. Jedinou výjimkou bylo testování s VBD typu C, kdy při řezné rychlosti $209 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s posuvem $0,32 \text{ mm}$ docházelo k vyšším vibracím ve směru pasivní složky řezné síly u předchozího experimentu. Ve směru složky posuvové síly dosahovaly při aktuálním experimentu hodnoty RMS opět vyšších hodnot, ale rozdíly mezi současným a předchozím experimentem nejsou tak značné, jako u dalších dvou měřených směrů a v několika případech způsoboval soustruh NLX menší vibrování v tomto směru.

Podle naměřených a vypočítaných výsledků lze vyhodnotit vliv utvařeče třísky na vibrace při soustružení v aktuálním i předchozím experimentu. Míra vlivu se liší dle řezných podmínek. Podle této práce není možné určit, jaký vliv mají dané VBD na vibrace, jelikož v tomto ohledu se minulý a aktuální výzkum v mnoha srovnání liší. Například v předchozím experimentu vykazuje soustružení s VBD typu A za daných řezných podmínek menší vibrace, než nastaly u procesu s VBD typu C při stejných řezných podmínkách. U aktuálního testování je při stejném srovnání situace zcela opačná. Rozhodně lze doporučit další testování na jednom ze dvou soustruhů, které byly použity v předchozím a nynějším experimentu pro ověření výzkumu. Utvařeč třísky má tedy vliv na velikost vibrací působících během soustružnického procesu, ale charakteristika tohoto vlivu je podle nynějšího a předešlého experimentu závislá na použitém stroji.

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D. za rady ohledně diplomové práce.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KULJANIĆ, Elso, G. TOTIS a M. SORTINO. *Vibrations and Chatter in Machining: State of the Art and New Approaches* [online]. In.: 2008 [cit. 2020-02-03]
- [2] GANGULI, Abhijit. *Chatter reduction through active vibration damping* [online]. Bruxelles, 2005 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://scmero.ulb.ac.be/Publications/Thesis/Ganguli05.pdf>. Disertační práce. Université Libre de Bruxelles. Vedoucí práce Andre Preumont.
- [3] FIALA, Bc. Zdeněk. *Vibrate při obrábění kovů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27465. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.
- [4] NESLUŠAN, doc. Dr. Ing. Miroslav, doc. Ing. Stanislav TUREK, CSC., doc. Dr. Ing. Jozef BRYCHTA, Ing. Robert ČEP, PHD. a Ing. Marián TABÁČEK. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [5] NAVRÁTIL, Miroslav. *Měření mechanického kmitání: Úvod do teorie snímačů*. Praha: SNTL, 1981
- [6] NAVRÁTIL, Miroslav a Oldřich PLUHAŘ. *Měření a analýza mechanického kmitání: metody a přístroje*. Praha: SNTL, 1986.
- [7] BUDA, Ján a Ján BÉKÉS. *Teoretické základy obrábání kovov*. 2. vyd. Bratislava: ALFA, 1977.
- [8] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II.: 1. díl Fyzikálně mechanické zákonitosti procesu obrábění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-228-5.
- [9] VASILKO, Karol. *Analytická teória trieskového obrábání* [online]. Prešov, 2007 [cit. 2020-02-03]. ISBN 978-80-8073-759-7. Dostupné z: <http://www.karolvasilko.com/download/Analyticka%20teoria%20trieskoveho%20obraba%20nia%202007.pdf>
- [10] HUMÁR, CSC., Doc. Ing. Anton. *TECHNOLOGIE I: Technologie obrábění – 1. část* [online]. VUT v Brně, 2003 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [11] HRUBÝ, Jindřich. *Teorie obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1985
- [12] PARUS, Arkadiusz, Mirosław PAJOR a Marcin HOFFMANN. *Supression of self-excited vibration in cutting proces using piezoeletric and electromagnetic actuators* [online]. 2009 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://advancesmst.prz.edu.pl/pdfy/03vol4Parus.pdf>
- [13] VETIŠKA, Jan. *Analýza stability řezného procesu obráběcího stroje vzhledem k samobuzenému kmitání* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/26215/Disertace.pdf?sequence=1&isAllo>

- wed=y. Disertační práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc.
- [14] FOJTŮ, Ing. Petr. *Problematika samobuzeného kmitání při obrábění* [online]. 2009 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/110218411-Problematika-samobuzeneho-kmitani-pri-obrabeni.html>
- [15] SISMILICH, Vladimír. *Vibrace při obrábění kovů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29382. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [16] TLUSTY, Jiri a George TLUSTY. *Manufacturing Processes and Equipment*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2000. ISBN 0201498650.
- [17] *Faktory ovlivňující vznik vibrací* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: sandvik.coromant.com/cs-cz/products/silent_tools/silent-tools/turning/factors_that_influence_vibration/pages/default.aspx
- [18] PROCHÁZKA, Luděk. *Vibrace při soustružení* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293468.pdf>. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.
- [19] *Základy obrábění* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>
- [20] *How to Eliminate Chatter* [online]. 2020 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/blog/post/how-to-eliminate-chatter>
- [21] *Pasivně-dynamická technologie tlumení vibrací zvyšuje produktivitu obrábění kovů* [online]. 2017 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://udrbapodniku.cz/hlavni-menu/artykuly/artikul/article/pasivne-dynamicka-technologie-tlumeni-vibraci-zvysuje-produktivitu-obrabeni-kovu/>
- [22] KRAEG, brüel. *Measuring vibration* [online]. Denmark, 1982 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/br0094.pdf>
- [23] *Waveform Measurements in Oscilloscope* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: https://www.hobbyprojects.com/oscilloscope_tutorial/waveform_measurements.html
- [24] *Vibration monitoring and its features for corelation* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/BobenAntoChemmannoor/vibration-monitoring-and-its-features-for-corelation>
- [25] VOJÁČEK, Antonín. *Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů* [online]. 2015 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [26] STANISLAUS, Charles. *Frictional damper to enhance dynamic stability in endmilling* [online]. Florida, 2003 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: http://etd.fcla.edu/UF/UFE0001440/stanislaus_m.pdf. University of Florida. Vedoucí práce Dr. John Ziegert.

- [27] SMITH, Dr. Scott. *Measuring machine vibration* [online]. 2013 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/articles/measuring-machine-vibration>
- [28] Grade : IC8250 [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Grade.aspx?grade=IC8250&item=5567471&fnum=3544&mapp=IS&app=0>
- [29] Upínací systémy břitových destiček [online]. 2013 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013_4_Upinaci%20systemy_britovych_desticek.pdf
- [30] CNMG-M3P [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=5567471&fnum=3544&mapp=IS&GFSTYP=M&srch=1>
- [31] CNMM-R3P [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5566794&fnum=3420&mapp=IS&app=30&GFSTYP=M&isoD=1>
- [32] CNMG/CNGG-PP [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5592316&fnum=59&mapp=IS&app=0&GFSTYP=M&isoD=1>
- [33] CNMM-M4PW [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5508282&fnum=2967&mapp=IS&app=20&GFSTYP=M&isoD=1>
- [34] DCLNL 2525 M 12 držák pro VBD soustružnický nůž vnější [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: https://www.falti.cz/dclnl-2525-m-12-drzak-pro-vbd-soustruznicky-nuz-vnejsi?gclid=Cj0KCQjwpfHzBRCiARIsAHHzyZrg0TOGTg4GAmlEv_LSZkHQgRaTmClwSgPWV_QZhKLaQ8xD9nRZF0QaAhx5EALw_wcB
- [35] DCLNR/L: Nožové drážky s úhlem nastavení 95° na 80° destičky [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3602070&fnum=1996&mapp=IS&GFSTYP=M&srch=1&lang=WZ>
- [36] DCLNR 2525M 12: Stopkové nástroje pro soustružení [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=dclnr%202525m%2012#query=%7B%22n%22:%22Tool%20Item%22,%22I%22:%22%22,%22r%22:%22TIBPAavailability%22,%22v%22:%22Available%22%7D%5D%7D%5D,%22c%22:%22%5B%5D%7D>
- [37] Uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://media0.obrabenikovo.cz/files/media0:571926fc1f8f5.pdf.upl/12050.pdf>
- [38] Souřadný systém CNC stroje NLX 2500 [online]. 2014 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DTNOftDDUGE>

- [39] NLX 2500: Vrchol v oblasti soustružnických center [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/soustruzeni/univerzalni-soustruzeni/nlx/nlx-2500/?utm_source=Google&utm_medium=CPC&utm_campaign=turning_CZ&gclid=Cj0KCQjwyPbzBRDsARIsAFh15JYL2bEMuZ5IdpXoczOkGpD4QQNjtpru4Xbi4nb8gT9H4ZUQIRX07ecaAkTCEALw_wcB
- [40] Kistler LabAmp: Charge Amplifier and Data Acquisition Unit for Dynamic Measurements [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=105891&model=document>
- [41] K-Shear Accelerometers: General purpose, voltage mode accelerometers [online]. 2008 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=111127&model=document>
- [42] Katalog přístrojového vybavení - Fakulta strojní, VŠB-TUO [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/cs/veda-a-vyzkum/oblasti-vyzkumu/Fakulta-strojni-Katalog-pristrojoveho-vybaveni.pdf>
- [43] PREISLER, Bc. David. Posouzení vlivu utvářeče třísky na vibrace při obrábění [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/137039/PRE0066_FS_N2301_2303T002_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.